

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**MOŽNOSTI APLIKACE ČEDIČOVÝCH VLÁKEN
DO BETONU**

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF BASALT FIBERS IN CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Zourek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Milan Zourek
Název	Možnosti aplikace čedičových vláken do betonu
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

Designing Concrete Structures for Fire Safety, ACI, SP-255

Bradáčová, I. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. ERA group, s.r.o. Brno 2007. ISBN 978-80-7366-090-1.

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.

Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Čedičová vlákna představují vedle již tradičně používaných vláken ocelových, polymerních, skleněných a celulóзовých poměrně novou skupinu vláken pro aplikace do cementových kompozitů.

V teoretické části diplomové práce popište způsob výroby čedičových vláken. Vyhledejte informace o vlastnostech čedičových vláken. Uveďte možnosti použití čedičových vláken, zaměřte se zejména na aplikace čedičových vláken do cementových kompozitů.

V experimentální části diplomové práce připravte beton s přídavkem čedičových vláken.

Sledujte vliv čedičových vláken na vlastnosti čerstvého betonu (zpracovatelnost, obsah vzduchu v čerstvém betonu) a na vlastnosti ztvrdlého betonu (pevnost betonu v tlaku, pevnost betonu v tahu ohybem). Provedte zatížení betonů s čedičovými vlákny na teplotu 600 °C a 800 °C a popište efekt přídavku čedičových vláken na vlastnosti betonů po působení těchto teplot. Zhodnoťte změny fyzikálních vlastností betonů a změny vzhledu betonů po teplotním zatížení. Dokumentujte přítomnost čedičových vláken v cementové matici pomocí optického mikroskopu.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možností aplikace čedičových vláken v betonu a cementových kompozitních materiálech.

V teoretické části je zpracován přehled běžně používaných vláken pro vláknobetony. Je zde popsána výroba čedičových vláken a sumarizovány jejich vlastnosti. Další část se zabývá vlastnostmi betonu vyztuženého čedičovými vlákny. Konkrétně potom jeho vlastnostmi v čerstvém stavu, fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, smršťováním a tvorbou trhlin, mikrostrukturou a požární odolností. Poslední kapitola teoretické části se zabývá požární odolností betonu obecně.

Experimentální část se dělí na dvě etapy. V první etapě byly navrženy dvě směsi betonu s čedičovým kamenivem a čedičovými vlákny a jedna referenční směs bez vláken. V čerstvém stavu byla stanovena konzistence sednutím kužele, obsah vzduchu v čerstvém betonu a objemová hmotnost. V ztvrdlém stavu byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a pevnost v tahu ohybem. Vzorky byly zahřáty na teploty 600 a 800 °C a byla stanovena změna objemové hmotnosti, změna pevnosti v tlaku, změna vzhledu a deformace v průběhu zahřívání.

V druhé etapě byly navrženy tři směsi jemnozrnného cementového kompozitu s čedičovými vlákny. V čerstvém stavu byla sledována objemová hmotnost a chování při míchání. V ztvrdlém stavu byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Vzorky byly zahřáty na teploty 600 a 800 °C a byla stanovena změna objemové hmotnosti, změna pevnosti v tahu za ohybu, změna pevnosti v tlaku a změna vzhledu.

KLÍČOVÁ SLOVA

čedičová vlákna, vláknobeton, beton vyztužený čedičovými vlákny, protipožární odolnost

ABSTRACT

This diploma thesis deals with possibilities of application of basalt fibers in concrete and in cementitious composites.

In the theoretical part there is a summary of fibers usually used for fiberconcretes. Manufacturing process of basalt fibers is described, and properties of basalt fibers are summarized. Next part deals with properties of basalt fiber reinforced concrete. Concretely fresh properties, physical-mechanical properties, shrinkage and cracking, microstructure and fire resistance. The last chapter deals with fire resistance of concrete in general.

The experimental part of this diploma thesis is divided into two phases. There were two mixes of basalt fiber reinforced concrete made with basalt aggregate and one mix of concrete without basalt fibers in the first phase. Density, consistency by slump and air content were determined as fresh properties. As hardened properties density, compressive strength and flexural strength were determined. There was determined the effect of the temperatures 600 and 800 °C on density, compressive strength and outward of specimens. Also, deformation during the high temperature curing was recorded.

In the second phase of the experimental part there were three mixes of cementitious composite made with basalt fibers and one cementitious composite without basalt fibers. Density was determined as a fresh property. Material was monitored during its mixing. As a hardened properties density, flexural strength and compressive strength were determined. There was determined the effect of the temperatures 600 and 800 °C on density, flexural strength, compressive strength and outward of specimens.

KEYWORDS

basalt fiber, fiberconcrete, basalt fiber reinforced concrete, fire resistance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Milan Zourek *Možnosti aplikace čedičových vláken do betonu*. Brno, 2018. 114 s., 122 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2018

Bc. Milan Zourek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za trpělivost a cenné rady při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat i ostatním zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, kteří mi byli nápomocni při zpracování této práce.

Mé díky patří i rodině a přítelkyni za podporu nejen při zpracování této práce, ale i v průběhu celého studia.

Obsah

I.	ÚVOD	12
II.	TEORETICKÁ ČÁST	13
1	Vláknobeton	13
1.1	Rozdělení vláken	13
1.1.1	Kovová vlákna	14
1.1.2	Polymerní vlákna	15
1.1.3	Skleněná vlákna	16
1.1.4	PVA	16
1.1.5	Celulózová vlákna	16
2	Čedičová vlákna	17
2.1	Technologie výroby	17
2.2	Vlastnosti	21
2.2.1	Teplotní odolnost	21
2.2.2	Chemická odolnost	22
2.2.3	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	25
2.2.4	Zdravotní nezávadnost	27
2.3	Použití	27
2.3.1	Plastové kompozitní materiály	27
2.3.2	Kompozity s kovovou maticí	28
3	Beton vyztužený čedičovými vlákny	29
3.1	Vlastnosti betonu v čerstvém stavu	30
3.2	Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu	30
3.2.1	Pevnost betonu v tlaku	31
3.2.2	Pevnost betonu v tahu ohybem	35
3.3	Smršťování a tvorba trhlin	38
3.4	Mikrostruktura	39
3.5	Požární odolnost	40
4	Vliv vysokých teplot na beton a jeho složky	42
4.1.1	Cementová pasta	43
4.1.2	Kamenivo	44
4.1.3	Soudržnost kameniva a cementové pasty	45
4.1.4	Změna pevnosti v tlaku	46
4.1.5	Změna pevnosti v tahu	47
4.1.6	Změna modulu pružnosti	47

4.1.7	Explozivní odprýskávání	48
4.1.8	Rozptýlená výztuž.....	49
III.	CÍL PRÁCE	51
IV.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	52
5	Etapa I	52
5.1	Schéma prováděných zkoušek	52
5.2	Charakterizace vstupních surovin	53
5.2.1	Cement	53
5.2.2	Kamenivo.....	53
5.2.3	Plastifikátor	56
5.2.4	Vlákna.....	56
5.3	Receptury.....	57
5.3.1	Směs REF	57
5.3.2	Směs 2,5BF	57
5.3.3	Směs 4BF.....	58
5.4	Příprava a ošetřování zkušebních vzorků	58
5.5	Popis prováděných zkoušek a měření.....	59
5.5.1	Objemová hmotnost v čerstvém stavu.....	59
5.5.2	Konzistence – zkouška sednutím	60
5.5.3	Obsah vzduchu v čerstvém betonu.....	60
5.5.4	Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu	60
5.5.5	Pevnost v tlaku	61
5.5.6	Pevnost v tahu ohybem	61
5.5.7	Zahřátí betonu na vysoké teploty.....	62
5.6	Výsledky provedených zkoušek	63
5.6.1	Vlastnosti v čerstvém stavu	63
5.6.2	Vlastnosti ve ztvrdlém stavu	65
5.6.3	Zahřátí betonu na vysoké teploty.....	67
5.7	Výsledky a diskuze.....	78
6	Etapa II	80
6.1	Schéma prováděných zkoušek	80
6.2	Charakterizace vstupních surovin	81
6.2.1	Cement	81
6.2.2	Kamenivo.....	81
6.2.3	Plastifikátor	81

6.2.4	Vlákna.....	81
6.3	Receptury.....	82
6.3.1	Směs REF0-4	82
6.3.2	Směs 4BF0-4.....	82
6.3.3	Směs 10BF0-4.....	82
6.3.4	Směs 20BF0-4.....	82
6.4	Příprava a ošetřování zkušebních vzorků	83
6.5	Popis prováděných zkoušek a měření.....	83
6.5.1	Chování při míchání.....	83
6.5.2	Objemová hmotnost v čerstvém stavu	83
6.5.3	Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu	84
6.5.4	Pevnost v tahu za ohybu	84
6.5.5	Pevnost v tlaku	85
6.5.6	Ověření přítomnosti vláken optickým mikroskopem.....	85
6.5.7	Zahřátí betonu na vysoké teploty.....	86
6.6	Výsledky provedených zkoušek	86
6.6.1	Chování při míchání.....	86
6.6.2	Objemová hmotnost v čerstvém stavu.....	89
6.6.3	Vlastnosti ve ztvrdlém stavu	89
6.6.4	Ověření přítomnosti vláken optickým mikroskopem.....	91
6.6.5	Zahřátí betonu na vysoké teploty.....	94
6.7	Výsledky a diskuze.....	101
V.	ZÁVĚR.....	103
VI.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	105
VII.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	111
VIII.	SEZNAM TABULEK.....	113
IX.	SEZNAM GRAFŮ	114
X.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	116
XI.	SEZNAM PŘÍLOH.....	117

I. ÚVOD

Betony s vlákny jsou v dnešní době běžně používaným materiálem. Vlákna z různých materiálů mohou být používána k ovlivnění řady vlastností ztvrdlého betonu. Například vlákna ocelová zlepšují tahové pevnosti a houževnatost betonu, polymerní vlákna zamezují vzniku smršťovacích trhlin a zlepšují požární odolnost, celulózová vlákna mají samoošetřovací schopnost, nebo vlákna skleněná, která zamezují vzniku smršťovacích trhlin a zlepšují mechanické vlastnosti betonu.

Čedičová vlákna vedle výše zmíněných vláken představují poměrně novou skupinu vláken do betonu. Jejich výroba se podobá výrobě vláken skleněných a stejně tak jejich použití. Mimo beton mohou být čedičová vlákna použita jako výztuž plastových kompozitních materiálů nebo na výrobu tkanin.

Čedičovým vláknům jsou přisuzovány dobré mechanické vlastnosti, chemická a teplotní odolnost a zdravotní nezávadnost. Současný výzkum na poli stavebních materiálů se poměrně často zabývá použitím čedičových vláken v betonu. Častým výsledkem je zlepšení tahových pevností a houževnatosti betonu s těmito vlákny.

Tato práce se zabývá použitím čedičových vláken v betonu, jejich vlivem na vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu a jejich vlivem na odolnost betonu vůči vysokým teplotám.

II. TEORETICKÁ ČÁST

Beton je materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody s přísadami nebo příměsemi nebo bez nich, který získá své vlastnosti hydratací cementu. [1]

1 Vláknobeton

Vláknobeton je speciální typ konstrukčních betonů, jejichž struktura obsahuje mimo obvyklých složek vlákna. Rovnoměrné rozptýlení vláken v betonu může významným způsobem ovlivnit některé jeho vlastnosti, a to často ty, které jsou pokládány za jeho slabiny. Vláknová výztuž je způsob, jak dosáhnout omezení smršťovacích trhlin, zvýšení lomové a rázové houževnatosti, zvýšení tahových pevností, zvýšení odolnosti vůči dynamickému namáhání, snížení obrušnosti, případně jak dosáhnout různých dalších speciálních vlastností, jako je například požární odolnost. [2] [3]

Ačkoliv vláknová výztuž může výrazně měnit a zlepšovat vlastnosti betonu, není jejím úkolem nahrazovat klasickou konstrukční tyčovou výztuž. Dalším rozdílem oproti klasické výztuži je rovnoměrné rozprostření vláken (výztuže) v celém průřezu. [2]

1.1 Rozdělení vláken

Vlákna do betonu můžeme rozdělit podle jejich chemického složení na polymerní, skelná a ocelová vlákna (drátky). Dalším hodnotícím kritériem je poměr délky a průměru. Vlákna rozdělujeme také podle jejich tvaru a podle obsahu v betonu vyjádřeném v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [4]

Tabulka 1 – Porovnání vlastností vybraných typů vláken [5]

Typ vlákna	Hustota [g·cm ⁻³]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení na mezi pevnosti [%]
Vysokopevnostní ocel	7,8	200	350-1 800	3,5
Nerezová ocel	7,8	160	2 070	3
E-sklo	2,5	72	3 450	4,8
Alkalivzdorné sklo	2,7	80	2 480	3,6
Polypropylen	0,9	5	35	18
Polyetylen	0,96	5-172	200-3 000	3-80
Akryl	1,18	18	200-1 000	28-50
Aramid	1,44	62-117	3 620	3,6
Azbest	3,4	196	29-260	2-3
Uhlík	1,9	380	1 793-2 620	0,5-0,7
Čedič	2,63	89	1 760	-

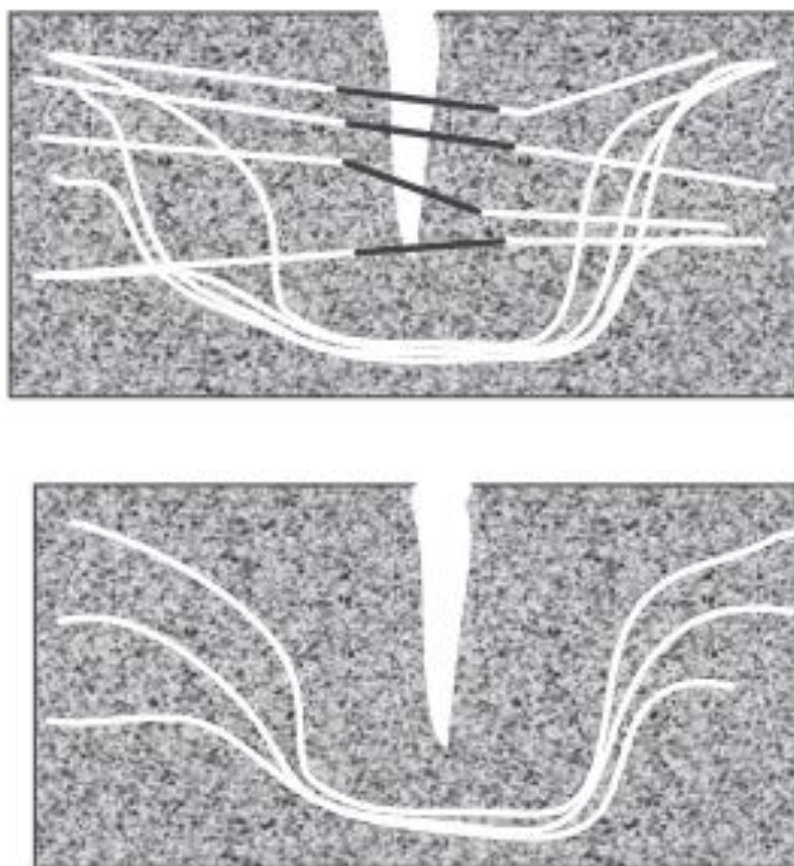
Vlákna se také dají dělit podle jejich působení ve vláknobetonu, čemuž se budou věnovat následující kapitoly.

1.1.1 Kovová vlákna

Kovová vlákna se běžně označují jako drátky a beton s nimi jako drátkobeton. Drátky v betonu obecně zlepšují tahové vlastnosti, houževnatost a rázové pevnosti. Drátkobeton oproti prostému betonu vykazuje zcela odlišné mechanické vlastnosti. Obvyklé dávkování drátků je 25 až 30 kg·m⁻³. [3] [4]

Ocelová vlákna můžeme rozdělit podle tvaru průřezu (kulatý, obdélníkový), podle technologie výroby (z taženého drátu, válcovaná, frézovaná), nebo podle tvarování (s koncovými kotvícími ohyby, s hladkým povrchem, s profilovaným povrchem). Drátky se vyrábějí typicky v průměrech d 0,15 do 1,2 mm a v délkách od 12 do 70 mm. Existují i různé pevnostní třídy, vlákna ovšem musí vyhovovat podmínkám pevnosti v tahu 600 až 1200 MPa. [3]

Beton vyztužený ocelovými vlákny má oproti běžnému betonu lepší houževnatost a vyznačuje se vyšší pevností v tahu ohybem. Vlákna umožňují betonu deformovat se a přenášet tahové zatížení i po jeho porušení. Drátkobeton je schopen přenášet tahové síly přes ocelová vlákna překlenující trhlinu. [2]



Obrázek 1 – Schéma přenosu napětí vyztuženého a nevyztuženého profilu [2]

1.1.2 Polymerní vlákna

1.1.2.1 Mikrovlákná

Nejčastěji jsou polymerní mikrovlákná vyráběna z polypropylenu (PP). Můžeme je rozdělit podle způsobu jejich výroby na monofilamentní a fibrilovaná. Monofilamentní vlákna jsou vyráběna jednotlivě a následně dělená na požadovanou délku. Vyznačují se kruhovým průřezem a hladkým povrchem. Fibrilovaná vlákna jsou vyráběna rozvlákněním fólie. Vyznačují se obvykle hranatým průřezem a drsnějším povrchem. PP mikrovlákná jsou obvykle opatřena povrchovou lubrikací, která zajistí jejich dokonalé rozdispergování při styku s vlhkostí. Jejich běžná dávka je 0,8 až 1,1 kg·m⁻³. [3] [4]

Vlákna jsou velmi jemná, tudíž zhoršují zpracovatelnost čerstvého betonu (voda je spotřebována na ovlhčení povrchu vláken). Na druhou stranu díky množství vody adsorbované na povrchu těchto vláken je v pozdějším stádiu možné dosáhnout samoošetřovacího efektu. Po rovnoměrné rozmísení vláken a zabránění tvorby shluků je nutné volit intenzivnější nebo delší míchání. [2]

Nejobvyklejší použití polymerních mikrovláken je pro:

- omezení vzniku smršťovacích trhlin,
- zvýšení mrazuvzdornosti a vodotěsnosti,
- zvýšení lomové a rázové houževnatosti,
- zvýšení odolnosti vůči dynamickému namáhání,
- zvýšení požární odolnosti,
- snížení obrušnosti,
- snížení ztrátového spadu směsi při aplikacích stříkaného betonu,
- snížení rozmísitelnosti čerstvé směsi a omezení odlučování vody ve směsi.

[2]

1.1.2.2 Makrovlákná

Polymerní makrovlákná spojují vlastnosti polymerních mikrovláken a ocelových drátků. Zlepšují pevnostní charakteristiky betonu houževnatost betonu. Zlepšují rovněž odolnost proti vysokým teplotám při požáru. Dávkování se různí podle použití. Běžné dávky jsou od 1 do 4 kg·m⁻³. Vyrábějí se v délkách 30 až 60 mm a průměrech 0,6 až 1 mm. [6] [7]

1.1.3 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna zabraňují vzniku mikrotrhlin v ranných fázích hydratace betonu. Pro takové použití vyžadujeme jejich rozvláknění. Také významně zlepšují fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu. V tomto případě by měla vlákna působit v prameni. Jejich obvyklá dávka se pohybuje mezi 0,6 až 1,2 kg·m⁻³. [2] [3]

Skleněná vlákna musí být vyrobena z alkalivzdorného skla s minimální obsahem 17 % ZrO₂. To zaručuje alkalivzdornost v silně alkalickém prostředí betonu (pH ≈ 12,5). Většinou také bývají opatřeny lubrifikačními. [2]

1.1.4 PVA

Konstrukční vlákna jsou často vyrobena z polyvinylalkoholu (PVA). Používají se na zlepšení tahových vlastností a modulu pružnosti betonu. [4]

1.1.5 Celulózová vlákna

Celulózová vlákna se používají v betonech pro zamezení vzniku trhlin a zvýšení trvanlivosti betonu. Vhodnost těchto vláken je založena na jejich velkém množství (1 540 mil vláken na 1 kg oproti PP vláknům – 35 mil na 1 kg), na dobré soudržnosti

s cementovým tmelem a na velmi dobrém rozptýlení vláken v matrici. Celulózová vlákna dokáží absorbovat vodu až do 80 % jejich vlhkosti a tím mohou snižovat případný bleeding nebo pomáhat k hydrataci betonu. [2]

2 Čedičová vlákna

Čedič je výlevná magmatická, jemnozrnná hornina šedočerné barvy. Je tvořen z 80 % stejným dílem plagioklasů a pyroxenů bohatých na vápník a z 20 % ostatními minerály jako je třeba olivín, pyroxen chudý na vápník a Fe-Ti oxidy. [8]

Tabulka 2 – Chemické složení čediče podle dvou různých autorů [9]

Složka	Obsah [%]	
	Zdroj 1	Zdroj 2
SiO ₂	43,3-47	42,43-55,69
Al ₂ O ₃	11-13	14,21-17,97
Fe ₂ O ₃	<5	10,80-11,68
CaO	10-12	7,43-8,88
MgO	8-11	4,06-9,45
Na ₂ O	<5	2,38-3,79
TiO ₂	<5	1,10-2,55
K ₂ O	<5	1,06-2,33

Čedičová vlákna jsou poměrně novým druhem vláken do betonu. Jejich použitím se zabývají současné výzkumy. Byla vyvinuta Moskevským výzkumným institutem pro sklo a plasty v letech 1953-1954. První průmyslová výroba byla provedena po 30 letech výzkumu a vývoje v roce 1985 na Ukrajině. Výrobní surovina byla roztavena v peci a protlačena tryskami přes perforovanou desku. [9]

2.1 Technologie výroby

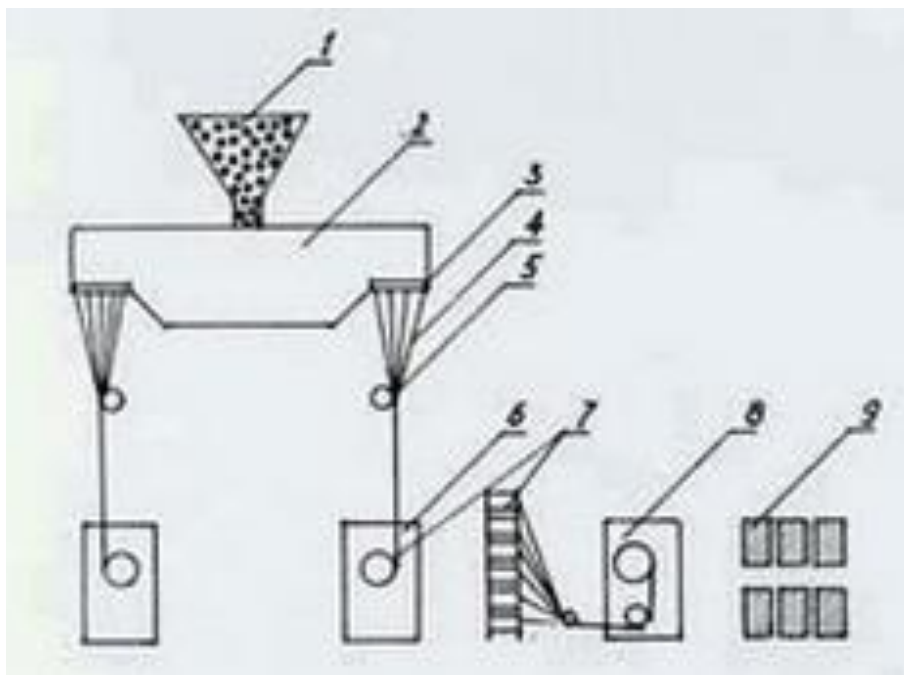
Výroba čedičových vláken je podobná jako výroba vláken skleněných. Podle informací, které uvádí Fiore a kol. je výroba čedičových vláken méně energeticky náročná oproti výrobě vláken skleněných. Dalším rozdílem je, že u výroby čedičových vláken není potřeba používat další přísady. K primárnímu roztavení, homogenizaci a obohacování čediče dochází při vulkanických činnostech – tedy samovolně v přírodě, při vzniku čedičové horniny. Díky tomu je výroba čedičových vláken levnější než výroba skleněných nebo uhlíkových vláken. [9] [10]

Čedičových hornin a možných surovin existuje velké množství druhů s různým chemickým složením. Proto je nutné pečlivě zvážit míru vhodnosti dané čedičové

horniny pro výrobu vláken. V předběžných studiích je potřeba zjistit vlastnosti čedičové horniny z hlediska tvorby taveniny, parametrů vzniklé taveniny, zejména viskozity, zpracovatelnosti a schopnosti tvoření vláken ze vzniklé taveniny. Pokud jsou tyto vlastnosti ve vhodném rozmezí, pokračuje se podrobnějším zkoumáním. [11]

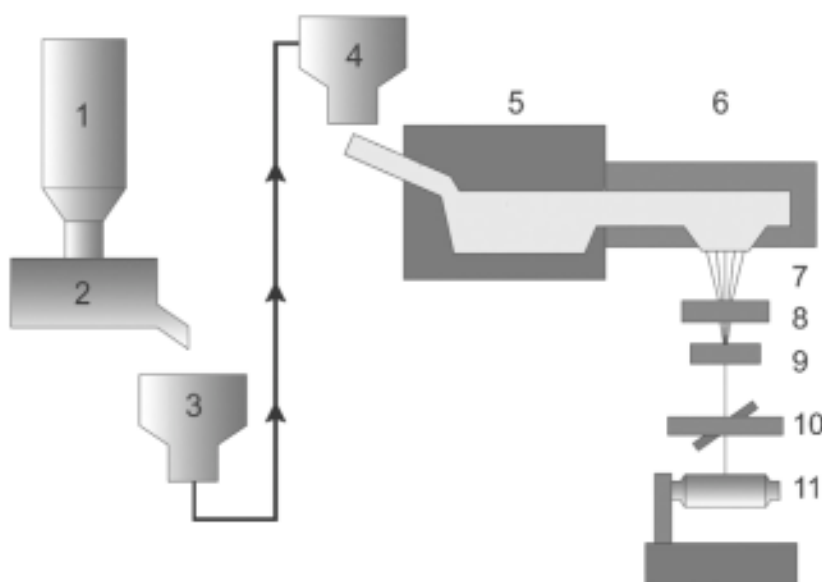
Čedičová vlákna se někdy vyrábí se speciální lubrifikací, aby se zajistila dobrá kompatibilita a rozdispergovatelnost v betonu i při vyšších dávkách. Vlákna jsou odolná v silně alkalickém prostředí betonu. [12]

Obrázek 2 ukazuje schéma výroby čedičových vláken. Natěžený čedič se podrtí na frakci 5 až 20 mm. Do pece se přivádí pomocí dopravníku do dávkovacího zařízení (číslo 1 na obrázku). Poté je roztaven v peci při teplotě 1 400 až 1 600 °C, kde přechází z krystalické na amorfni strukturu (číslo 2 na obrázku). Dále se musí vzniklá tavenina připravit k tvorbě vláken dosažením požadované homogenity a viskozity. Tavenina se protlačuje tryskou přes průchodku ve tvaru kelímku vyrobenou ze slitiny platiny a rhodia (číslo 3 na obrázku). Najednou se táhne 200 až 500 vláken. Tato technologie se nazývá kontinuální odstředování. Vlákna jsou tažena (číslo 4 na obrázku) do části zařízení, která je opatřuje lubrifikací (číslo 5 na obrázku). Poté jsou přes navíjecí zařízení (číslo 6 na obrázku) navíjena na cívku (číslo 7 a 8 na obrázku). Výsledkem jsou kontinuální vlákna ve formě rovingu nebo cívek (číslo 9 na obrázku). [9] [10] [13]



Obrázek 2 – Schéma výroby čedičových vláken [13]

Obrázek 3 ukazuje obdobné schéma výroby: 1) silo na podrcenou horninu; 2) dávkovací zařízení; 3) dopravní systém; 4) místo plnění vsázky do pece; 5) primární tavení; 6) sekundární tavící zóna s přesným řízením teploty; 7) pouzdra tvarující vlákna; 8) dimenzování vláken; 9) tvorba pramenů; 10) napínací zařízení; 11) navíjecí zařízení. [9]



Obrázek 3 – Schéma výroby čedičových vláken [9]

Existují dva způsoby výroby sekaných vláken. První způsob je sekaní z rovingů, které vznikají při výrobě kontinuálních vláken. Tento způsob je jednodušší. Druhým

způsobem je sekání celých svazků primárních vláken přímo v procesu výroby, tzv. okamžité sekání. Tento způsob je produktivnější a používá se při větším objemu vyráběných vláken. [14]



Obrázek 4 – Zařízení s průchodkami na výrobu čedičových vláken [15]



Obrázek 5 – Čedičová vlákna ve formě rovingu [13]

2.2 Vlastnosti

Mezi přednosti čedičových vláken patří vysoká odolnost proti chemicky agresivním prostředím – odolávají jak kyselým, tak zásaditým, odolnost proti vysokým teplotám a dobré fyzikálně-mechanické vlastnosti. [16]

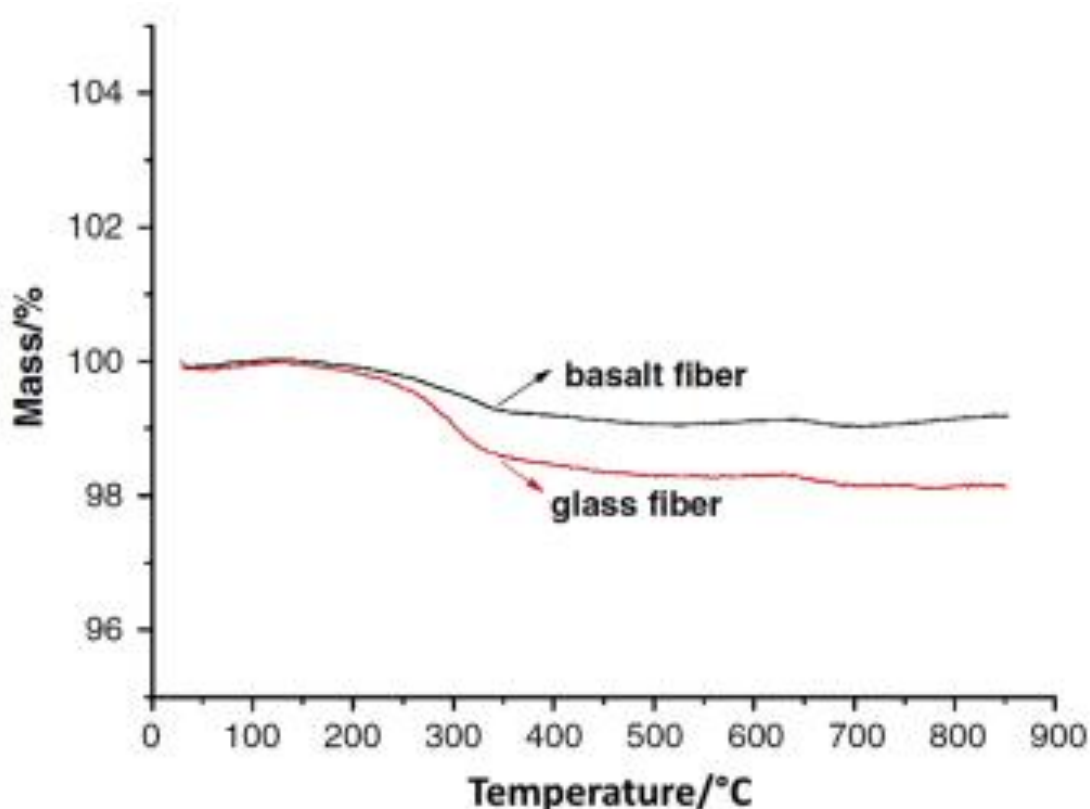
Fyzikální, fyzikálně-mechanické a chemické vlastnosti, stejně jako cena produktu, závisí na kvalitě suroviny a jejím chemickém složení. Čedičová vlákna mají větší pevnost v tahu než vlákna vyrobená z E-skla. Mají také dobrou rázovou houževnatost a odolnost proti ohni. [9] [17]

2.2.1 Teplotní odolnost

Čedičová vlákna jsou nehořlavá a vysoce teplotně stabilní. Mohou být použita od -200 °C až do teplot 600-800 °C. Čedič je výlevná hornina vznikající při vysokých teplotách, to vede k vysoké teplotní stálosti čedičových vláken. Hlavním faktorem určujícím stabilitu čedičových vláken ve vysokých teplotách je jejich krystalizační chování. Krystalizační schopnost závisí na chemickém složení a teplotních podmínkách. [9] [18]

Gravimetrická analýza ukazuje že jak u skleněných, tak u čedičových vláken dochází k největšímu úbytku hmotnosti při teplotách 250-300 °C. Čedič má však lepší tepelnou stabilitu a úbytek hmotnosti je menší. [9]

Graf 1 – Změna hmotnosti vláken v závislosti na teplotě [19]



(Mass – hmotnost, temperature – teplota, basalt fiber – čedičové vlákno, glass fiber – skleněné vlákno)

Förster a kol. provedli experiment, při kterém zkoumali změnu pevnosti čedičových vláken při vysokých teplotách. Výsledky ukázaly, že teplotní namáhání výrazně snižuje pevnost v tahu vláken. Maximální pokles pevnosti v tahu zaznamenali při teplotě 350 °C. To je teplota, při které výsledky gravimetrické analýzy ukázaly také významnou ztrátu hmotnosti, což potvrzuje i výše uvedený graf 1. [19]

Ying a kol. porovnávali teplotní odolnost čedičových a skleněných vláken. Po 3 hodinovém působení teploty 300 °C nejsou patrné žádné změny v pevnostech v tahu ani u jednoho druhu vláken. Po 4 hodinovém a delším působení teploty 300 °C byl zaznamenán mírný nárůst pevnosti v tahu čedičových vláken. Při zahřátí na teploty 400 a 600 °C pevnosti obou druhů vláken významně klesaly. Nicméně čedičová vlákna si svou pevnost zachovávala lépe než skleněná. [18]

2.2.2 Chemická odolnost

Čedičová a skleněná vlákna spojuje vysoká odolnost proti kyselému prostředí a horší odolnost proti prostředí alkalickému. Přestože korozní procesy čedičových i

skleněných vláken v silně alkalickém prostředí jsou podobné, čedičová vlákna se ukazují jako odolnější. [9]

Následující tabulka je od ruského výrobce Kamennyj Vek o jeho produktu Basfiber®. Ukazuje chemickou odolnost čedičového vlákna v alkalickém a kyselém prostředí ve srovnání s alkalicky odolným skleněným vláknem a vláknem vyrobeným z E-skla.

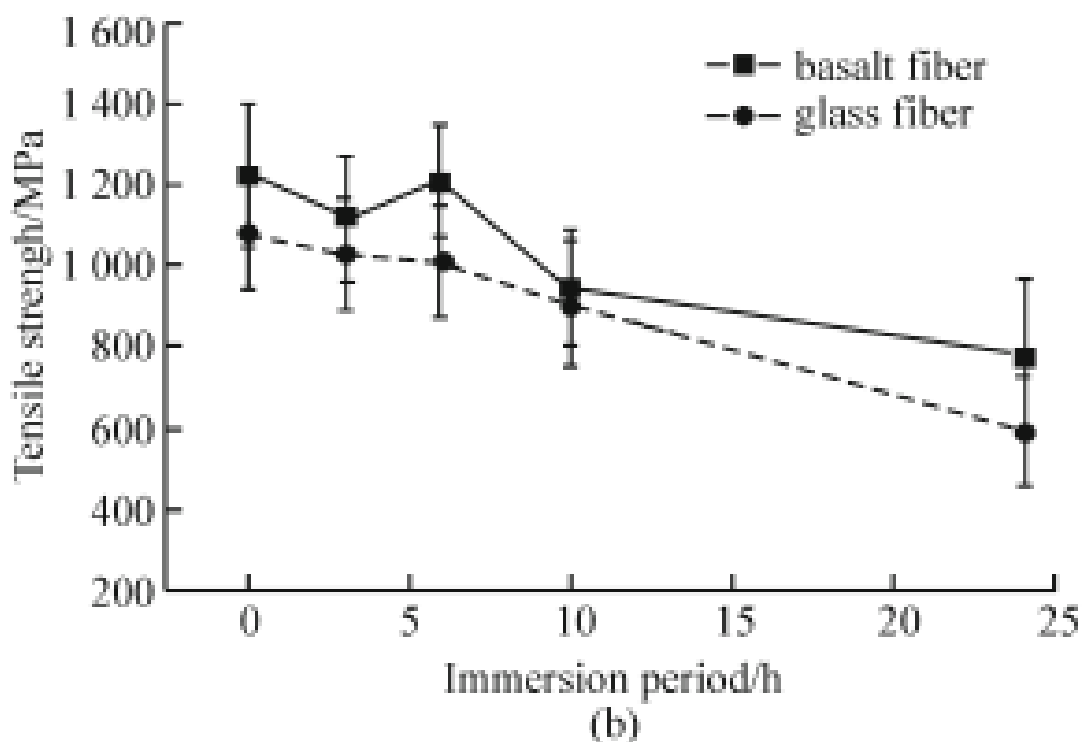
Tabulka 3 – Chemická odolnost čedičového vlákna Basfiber® [12]

Chemická odolnost	Basfiber®	Alkalicky odolné sklo	E-sklo
Ztráta hmotnosti vlákna [%] po 3 hodinách vaření v nasyceném cementovém roztoku	0,35	0,15	4,5
Ztráta hmotnosti [%] vlákna po 3 hodinách vaření v roztoku HCl o $c = 1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$	7,1	-	38,5

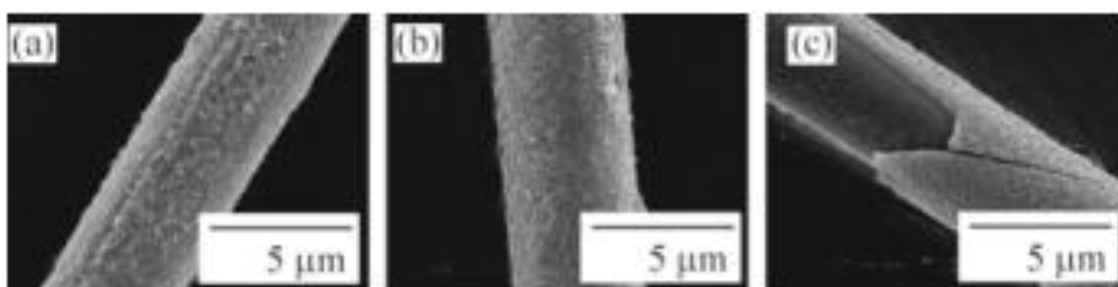
Jiný experiment zkoušel odolnost skleněných a čedičových vláken v silně alkalickém prostředí NaOH a cementu. Ukázalo se, že uložení v roztoku NaOH vede k silnému rozpouštění vnější vrstvy skleněných i čedičových vláken, zatímco při stárnutí v roztoku cementu při stejném pH dochází pouze k omezenému lokálnímu porušení. Bylo dokázáno, že povlak oxidu zirkoničitého (ZrO_2) zpomaluje korozi čedičových vláken v alkalickém prostředí. [9]

Ying a kol. porovnávali chemickou odolnost čedičových a skleněných vláken. Vlákn byla testována v prostředí NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ o teplotě 100°C . Byla zkoumána změna pevnosti v tahu vláken. Z výsledků, které ukazuje graf 2 je patrné, že v počátečním stádiu klesá rychleji pevnost čedičových vláken. Ovšem při delším působení agresivního prostředí klesá pevnost čedičových vláken méně než pevnost vláken skleněných. [18]

Graf 2 – Změna pevnosti v tahu vláken při působení roztoku NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ při teplotě 100°C [18]



(Tensile strenght – pevnost v tahu, immersion period – doba působení, basalt fiber – čedičové vlákno, glass fiber – skleněné vlákno)



Obrázek 6 – Čedičové vlákno po uložení v roztoku NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ při teplotě 100°C . Doba uložení: (a) 1 hodina, (b) 6 hodin, (c) 24 hodin [18]

Na obrázku 6 jsou snímky z elektronového rastrovacího mikroskopu čedičového vlákna, které bylo uloženo v roztoku NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ při teplotě 100°C po dobu 1 (a), 6 (b) a 24 hodin (c). V počáteční fázi je patrná pórová struktura na povrchu vlákna, která zde vzniká v důsledku koroze. Po 6 hodinách se na povrchu vytvoří hydroxidový film, který vyplní póry a brání dalšímu poškození vlákna. To způsobuje mírný nárůst pevnosti, který je patrný na grafu 2. Po 24

hodinách v tomto silně alkalickém prostředí můžeme pozorovat rozpad ochranného filmu. [18]

2.2.3 Fyzikálně-mechanické vlastnosti

Čedičová vlákna se vyznačují vysokým modulem pružnosti, vysokou tahovou pevností a vhodným elastickým chováním. Tyto vlastnosti je činí dobrou alternativou k dnes už tradičně používaným vláknům skleněným. Čedičová vlákna mají větší pevnost v tahu než vlákna vyrobená z E-skla. Mají také dobrou rázovou houževnatost a odolnost proti ohni. [9] [17]

Tabulka 4 porovnává některé důležité vlastnosti vláken čedičových a vláken vyrobených z E-skla. Tabulka 5 potom porovnává vlastnosti čedičových vláken s dalšími běžně používanými vlákny. Je zde také orientačně uveden velmi důležitý faktor, a to cena vláken.

Tabulka 4 – Porovnání vlastností skleněných a čedičových vláken [15]

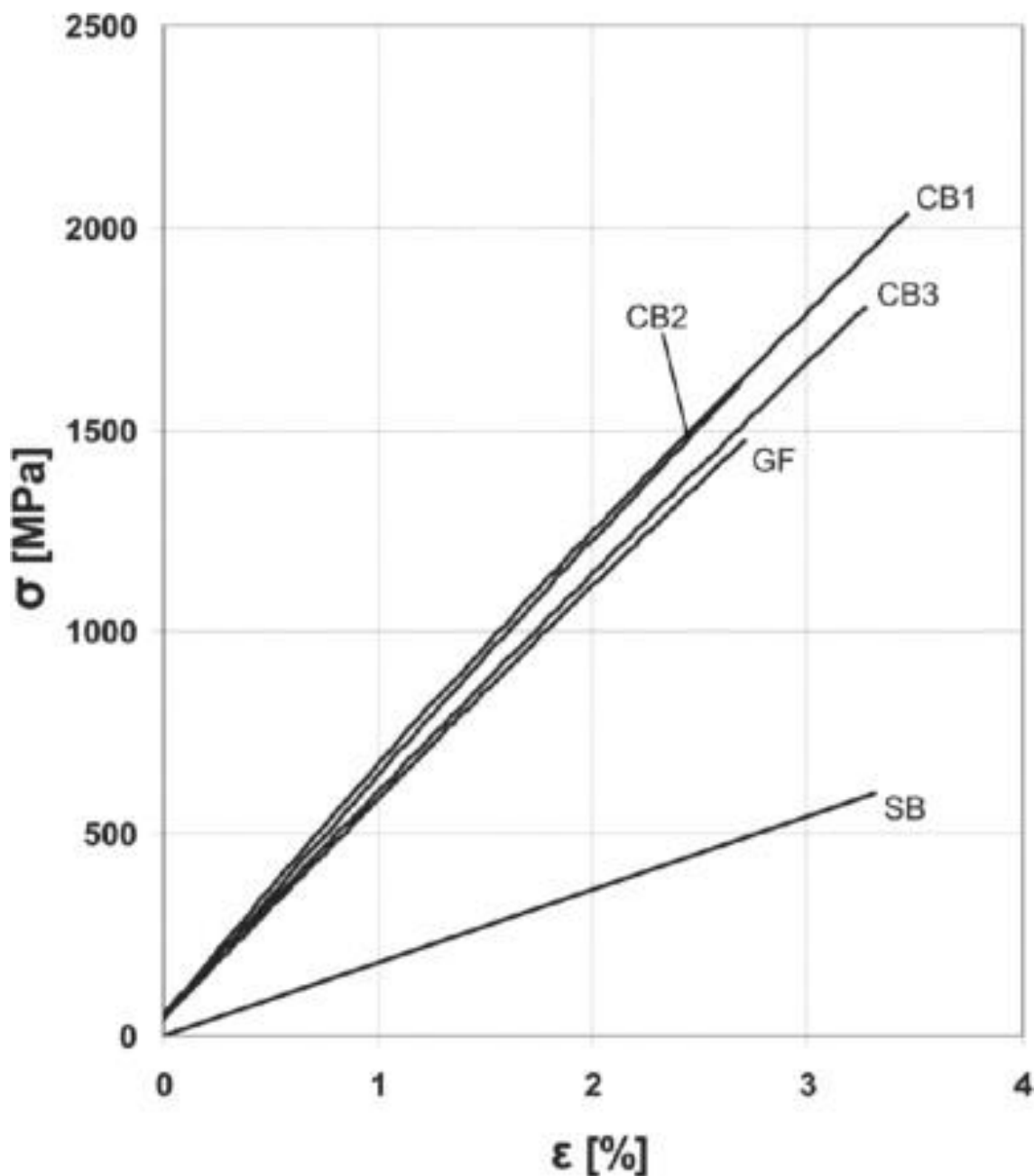
Vlastnost	Čedičová vlákna BCF-13-- 1200-KV12	Skleněná vlákna P 139 13.1200
Měrná hmotnost vlákna [g·cm ⁻³]	2,67	2,55
Délková hmotnost [Tex]	1 200	1 237
Pevnost v tahu [MPa] dle ISO 9163	3 000	2 050
Modul pružnosti [GPa] dle ISO 9163	93	76
Protažení [%] dle ISO 9163	3,50	3,02

Tabulka 5 – Porovnání vlastností čedičových, skleněných a uhlíkových vláken [20]

Typ vláken	Čedičová	E-sklo	S-sklo	Uhlíková
Pevnost v tahu [MPa]	3 000-4 840	3 100-3 800	4 020-4 650	3 500-6 000
Modul pružnosti [GPa]	79,3-93,1	72,5-75,5	83-86	230-260
Protažení při porušení [%]	3,1	4,7	5,3	1,5-2,0
Průměr vlákna [μm]	6-21	6-21	6-21	5-15
Délková hmotnost [Tex]	60-4 200	40-4 200	40-4 200	60-2400
Cena [USD/kg]	2,5-3,0	1,1	1,5-2,5	30-50

Graf 3 přehledně porovnává pracovní diagramy vláken z E-skla (GF), krátkých čedičových vláken (SB) a nekonečných čedičových vláken od tří různých výrobců (CB1, CB2, CB3) při zkoušce pevnosti v tahu.

Graf 3 – Pracovní diagramy čedičových a skleněných vláken [9]



(CB1, CB2, CB3 – nekonečná čedičová vlákna různých výrobců, GF – vlákna z E-skla, Sb – krátká čedičová vlákna)

Všechna testovaná vlákna mají tuhé chování bez plastické deformace. Tahové moduly pružnosti a pevnosti v tahu kontinuálních skleněných i čedičových vláken

jsou velmi podobné, zatímco krátká čedičová vlákna jsou podstatně méně tuhá, tzn. mají nižší modul pružnosti. [9]

Mechanické vlastnosti čedičových vláken úzce souvisí s přítomností povrchových heterogenit, jakou jsou povrchové a strukturní vady nebo nečistoty. Tyto heterogenity dělají naměřené mechanické vlastnosti výrazně nižší než jejich maximální teoretické hodnoty. Tento nedostatek lze eliminovat povlaky na bázi epoxidové pryskyřice aplikovanými metodou sol-gel (metoda nanášení tenkých filmů, kdy se mění koloidní suspenze na gel). [9]

2.2.4 Zdravotní nezávadnost

Vzhledem k tomu, že čedičová vlákna mají podobný charakter jako vlákna azbestová, se nabízí otázka zdravotní nezávadnosti čedičových vláken. Výzkumy ukázaly že čedičová vlákna jsou pro lidi zdravotně nezávadná. Od azbestových vláken se liší morfologií i povrchem. Vlákná s menším průměrem než 1,5 μm zůstávají ve vzduchu a lze je vdechnout, avšak nejsou příčinou zdravotních problémů, které jsou spojeny s azbestem. Příčinou karcinogenity azbestových vláken jsou velmi malá vlákna o průměru 0,5 μm , které lze vdechnout, zůstávají v plicních kanálcích. Čedičová vlákna mají větší průměr, jak je uvedeno výše. [9]

2.3 Použití

Čedičová vlákna jsou svými vlastnostmi velmi podobná vláknům skleněným a ukazují se tedy být jejich alternativou. Mohou být použita do plastových kompozitních materiálů, do betonu, na výrobu geotextilních sítí a tkanin nebo rohoží z nasekaných vláken. [9] [14]

2.3.1 Plastové kompozitní materiály

Čedičová vlákna se stejně jako ostatní vlákna dají používat jako výztuž do vláknových kompozitních materiálů s polymerní matricí (FRP). Jsou kompatibilní se všemi běžnými pryskyřičnými systémy: epoxidovými, polyesterovými, vinylesterovými, fenolitickými, polyuretanovými nebo polypropylenovými. Zpracování s pryskyřicemi se může provádět všemi běžnými postupy jako je pultruze, navíjení, nanášení sprayem, BMC nebo SMC lisování. Vláknem lze také zpracovat do běžných nebo netkaných textilií, či do formy víceosých tkanin. [15]

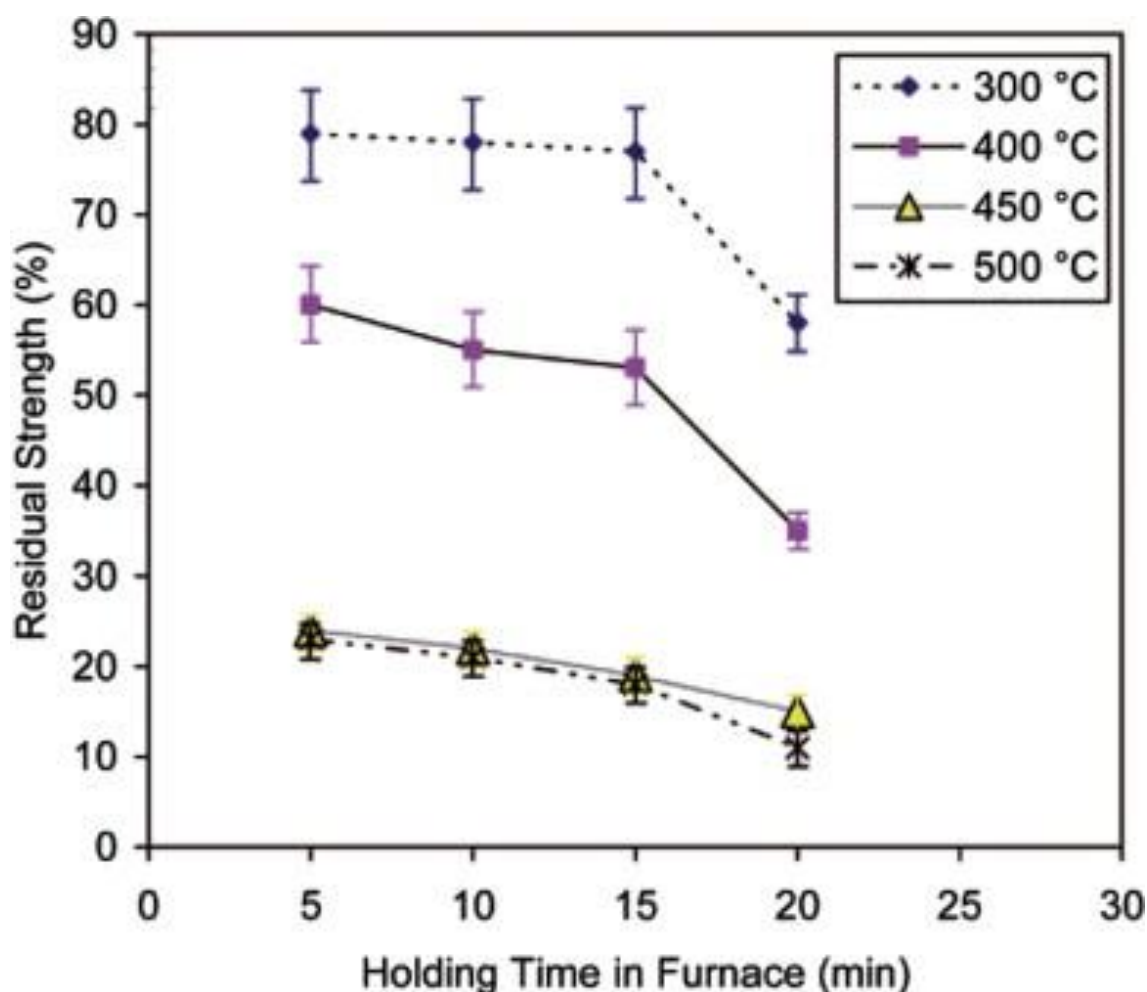
Takto připravené výrobky mohou být použity pro výrobu vysokotlakých nádob, nosných profilů, lodí, prvků používaných v automobilovém průmyslu a dalších průmyslových odvětvích. [15]

Ve stavebnictví lze použít FRP výztuže s čedičovými vlákny na místo běžně používaných FRP výztuží se skleněnými, či uhlíkovými vlákny. [9]

2.3.2 Kompozity s kovovou maticí

Díky keramické povaze čedičových vláken, se dají vhodně použít na vyztužování kovů. Možnost jejich použití závisí zejména na podmínkách při zpracování kovu. Při vyšší teplotě (500 °C) a delším zpracování kovu než 15 minut ztrácejí vlákna pevnost (graf 4). Čedičová vlákna mohou být použita například s hliníkovou maticí. Pro zlepšení spolupůsobení na rozhraní kov-vlákno se může použít měděný povlak. [9]

Graf 4 – Změna pevnosti v tahu čedičových vláken v závislosti na teplotě a délce působení teploty [9]



(Residual Strenght – zbytková pevnost, Holding Time in Furnace – doba působení teploty v peci)

3 Beton vyztužený čedičovými vlákny

Díky svým vynikajícím vlastnostem mohou být čedičová vlákna použita i do betonu. Beton s čedičovými vlákny je kompozit na bázi cementu, jemného a hrubého kameniva a čedičových vláken. Můžeme ho nazvat jako beton vyztužený čedičovými vlákny nebo anglicky jako Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC).

Ruský výrobce Kammenyj Vek vyrábí čedičová vlákna pod názvem Basfiber® pro beton ve dvou formách. První je kontinuální vlákno ve formě rovingu pro stříkané malty a betony. Vyrábí se v průměrech 13 až 17 μm a s lubrikací na zlepšení alkalické odolnosti. Druhou formou jsou již nasekaná vlákna v průměrech od 13 do 19 μm v délkách od 3 do 50 mm. [12]

Obvyklé dávkování čedičových vláken je 1,5 až 2,0 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Jeden cm^3 obsahuje kolem 100 jednotlivých vláken. Výsledkem by podle výrobců mohlo být zvýšení pevnosti v tlaku o 20 až 25 %, zvýšení pevnosti v tahu ohybem o 200 až 230 %, zlepšení mrazuvzdornosti a zamezení vzniku smršťovacích trhlin. Čedičová vlákna v betonu nepodléhají poškození vlhkostí, rozmrazovacími látkami nebo mořskou vodou. [14]



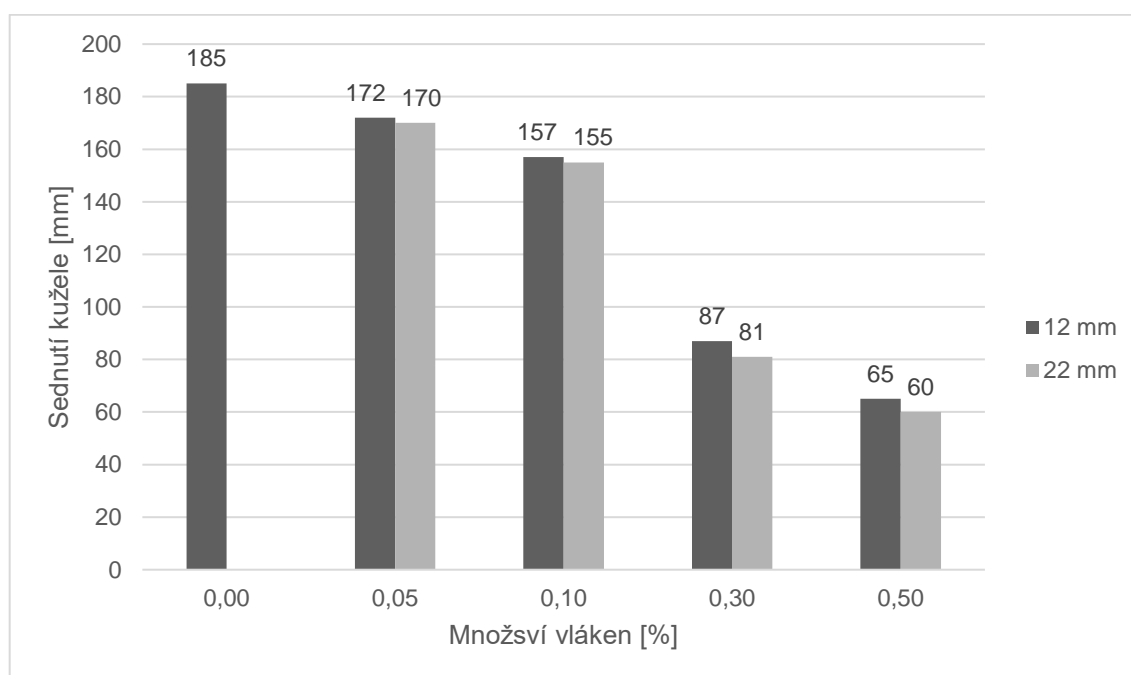
Obrázek 7 – Nasekaná čedičová vlákna

3.1 Vlastnosti betonu v čerstvém stavu

Přidání vláken do čerstvého betonu zpravidla zhoršuje jeho vlastnosti, zejména zpracovatelnost. Nejinak je tomu u čedičových vláken.

Jiang a kol. provedli experiment, kdy byla do betonu přidána čedičová vlákna. Byl použit portlandský cement, popílek, jemné těžené kamenivo frakce 0-3 mm a hrubé drcené kamenivo s maximálním zrnem 5 mm. Čedičová vlákna o průměru přibližně 20 μm byla v délkách 12 a 22 mm v množství 0,05 %, 0,1 %, 0,3 % a 0,5 % z celkového objemu betonu. [21]

Graf 5 – Vliv množství vláken na zpracovatelnost čerstvého betonu [21]



Jemná vlákna vnáší do betonu značný povrch, který musí být při míchání obalen cementovým tmelem. Vzhledem k větší ploše povrchu, než má kamenivo, vlákna adsorbují více cementového tmele, což vede ke zvýšení viskozity celé směsi. To má za následek zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu. [17] [22]

3.2 Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu

Obecně lze říci, že čedičová vlákna v betonu nepůsobí nijak příznivě na pevnost betonu v tlaku. Naopak při jejich správném použití lze očekávat zlepšení tahových pevností. Významný vliv zde hraje délka vlákna. Delší vlákna jsou lépe ukotvena v betonu a lépe zabraňují vzniku trhlin a tahovému poškození betonu. S nárůstem

délky vláken je však složitější docílit jejich rovnoměrného rozložení v cementových kompozitech. [9] [21]

Čedičová vlákna v betonu výrazně snižují smršťování cementové malty. Výzkum ukázal, že cementové malty vyztužené čedičovými vlákny mají také vyšší pevnost v tlaku a v tahu ohybem v ranných fázích hydratace. Po 28 dnech je však pevnost v tlaku nižší, než u malty bez vláken [9]

Jiné výzkumy také zkoumaly mechanické vlastnosti betonů s přidavkem různého množství a velikostí čedičových vláken. Ukázalo se zejména zlepšení pevnosti v tahu, v tahu ohybem a odolnosti proti abrazi, zatímco pevnost v tlaku se buď neměnila, nebo dokonce klesala. Jak už bylo uvedeno výše, významný vliv na změnu mechanických vlastností má délka použitých vláken. [9]

3.2.1 Pevnost betonu v tlaku

Pevnost v tlaku betonu není vlastnost, kterou by měla čedičová vlákna zlepšovat. Různé zdroje ukazují častěji mírné zhoršení pevnosti v tlaku než její zlepšení. Mírné zlepšení může nastat v raných fázích hydratace po 7 dnech. Ovšem po 28 a 90 dnech jsou pevnosti v tlaku většinou nižší. [9] [21]

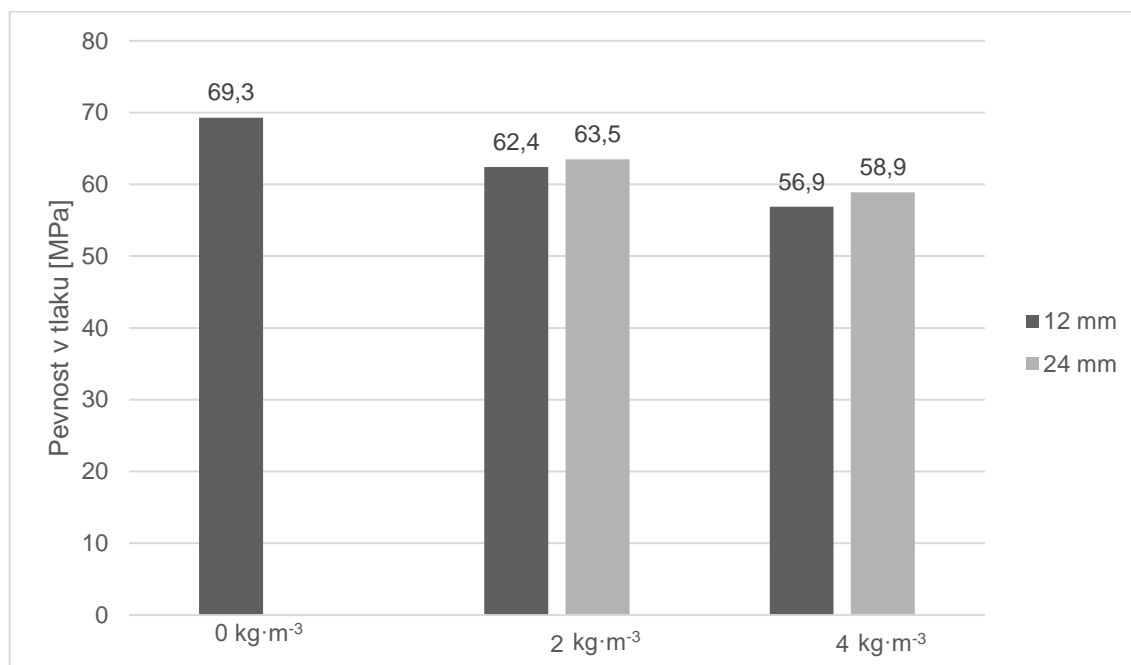
Důvodem snížení pevnosti v tlaku je zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu, a tudíž jeho méně dokonalé zhutnění a následně zhoršení soudržnosti na rozhraní vlákna a cementové matrice při zrání betonu. [21]

Beton vyztužený vlákny však vykazuje rozdílné chování oproti betonu bez vláken. Při tlakovém porušení se na vzorku betonu bez vláken vytvoří několik svislých trhlin. U betonu vyztuženého vlákny se po tlakovém porušení trhliny v takovém množství neobjevují a beton si udržuje celistvý vzhled a určitou soudržnost i po porušení (obrázek 8). [21]

Kabay testoval beton s čedičovými vlákny o délkách 12, respektive 24 mm o průměru 13-20 μm . Dávky vláken byly 2 a 4 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V betonu byl použit portlandský cement CEM 42,5 R, hrubé drcené kamenivo, jemné drcené kamenivo a jemné těžené kamenivo. Vodní součinitel byl 0,45. Byl také přidán superplastifikátor na bázi polykarboxylátu tak, aby bylo sednutí kužele v rozmezí 100-160 mm. [22]

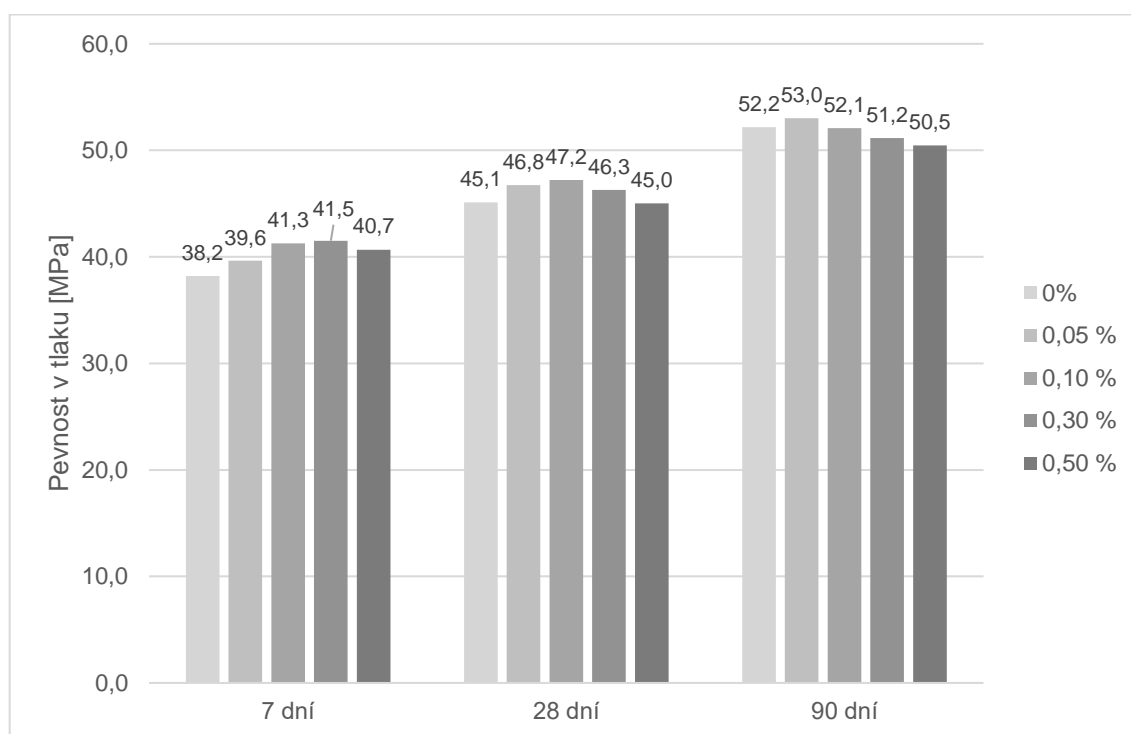
Přidání čedičových vláken v množství 2 a 4 kg·m⁻³ vedlo ke snížení pevnosti v tlaku po 28 dnech oproti betonu bez vláken. Kratší vlákna způsobovala větší pokles pevnosti v tlaku.

Graf 6 – Pevnost betonu v tlaku s různým množstvím vláken [22]

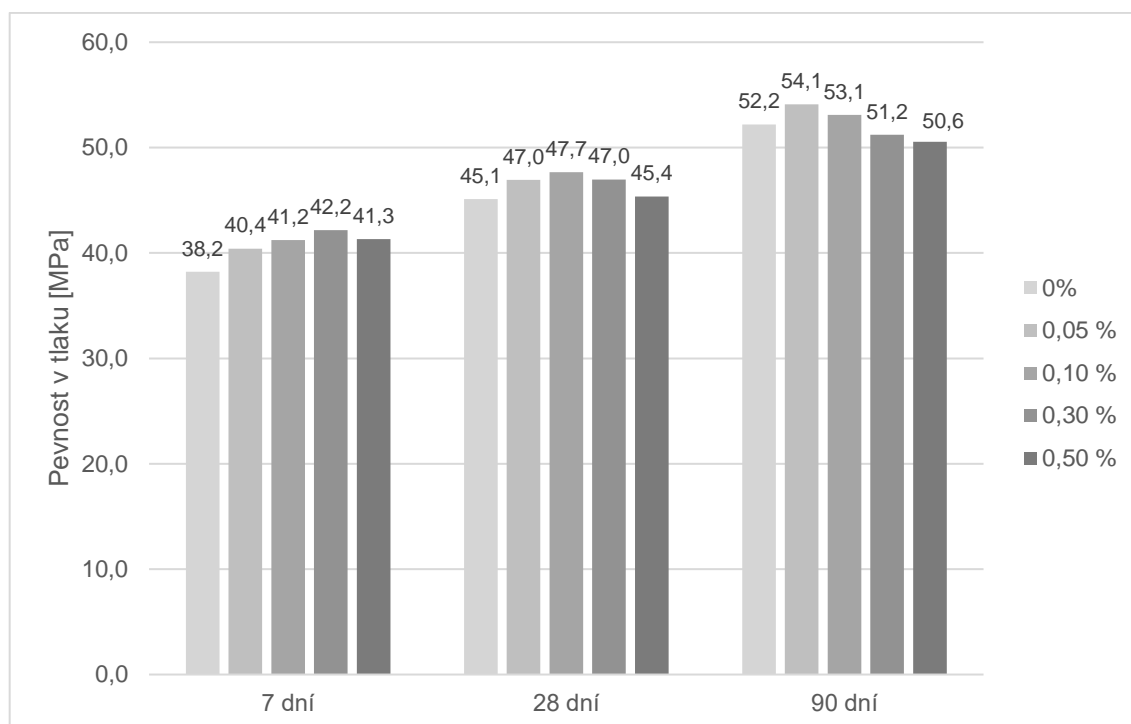


Grafy 7 a 8 ukazují výše zmíněný experiment, který provedli Jiang a kol. Jsou zde uvedeny pevnosti v tlaku betonu s čedičovými vlákny délky 12 a 22 mm ve stáří 7, 28 a 90 dní. [21]

Graf 7 – Vývoj pevností v tlaku betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 12 mm [21]



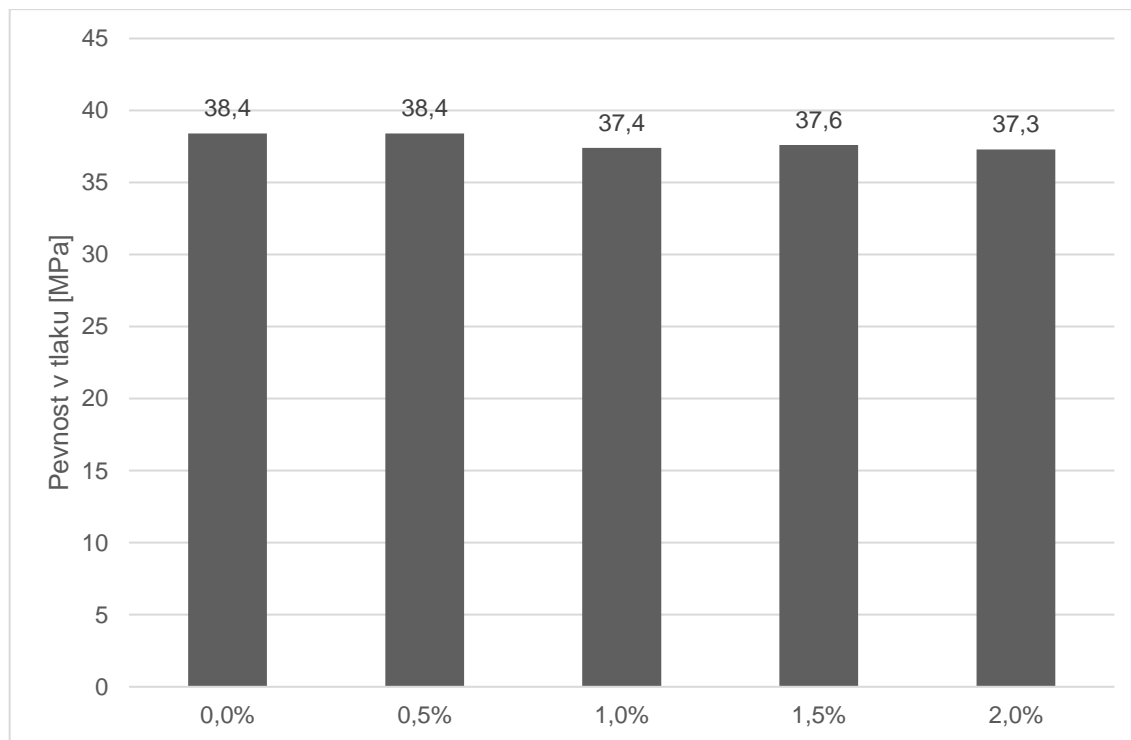
Graf 8 – Vývoj pevností v tlaku betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 22 mm [21]



Na výsledcích můžeme vidět, že pevnosti v tlaku se pohybují okolo stejné hodnoty, jakou má referenční beton bez vláken. Zlepšení pevností je patrnější při stáří vzorků 7 dní. Na základě výsledků můžeme také říci, že větší vliv na pevnost v tlaku mají vlákna o délce 22 mm. [21]

Jalasutram a kol. zkoumali vliv většího množství čedičových vláken na mechanické vlastnosti betonu. Použili portlandský cement, hrubé drcené kamenivo s maximálním zrnem 20 mm a drobné těžené kamenivo. Vodní součinitel byl 0,45. Použitá čedičová vlákna měla průměr 13 μm a délku 12,7 mm. Byla dávkována v množství 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % a 2,0 % z celkového objemu betonu. Vzorky byly zkoušeny po 28 dnech. [5]

Graf 9 – Vliv množství vláken na pevnost v tlaku betonu po 28 dnech [5]



Podle grafu 9 můžeme usoudit, že přidání více než 0,5 % vláken způsobuje pokles pevnosti v tlaku betonu. Zajímavé je ovšem porušení jednotlivých vzorků, které ukazuje obrázek 8. Na fotografiích můžeme vidět, že u vzorků bez vláken a s 0,5% dávkou vláken (BFRC1 a BFRC2) vzniká při porušení v tlaku množství vertikálních trhlin, které se šíří po celé výšce vzorku a způsobují rozpad vzorku. Zatímco u vzorků s větším množstvím vláken 1,5 a 2 % (BFRC4 a BFRC5) jsou šířky trhlin menší, což ukazuje dobrou soudržnost vláken s cementovou matricí. To zamezilo boční expanzi betonu. Trhliny se většinou objevily při 80-90 % maximálního zatížení, které byl beton schopen přenést. Nicméně i potom byly vzorky schopné přenášet určité zatížení. Lze tedy říci že, i když přidání čedičových vláken pevnost betonu v tlaku spíše zhoršuje, je beton s čedičovými vlákny schopen přenášet určité

zatížení i po počátečním porušení a vykazuje tak jiné chování než beton bez vláken.
[5]



(BFRC1)



(BFRC2)



(BFRC4)



(BFRC5)

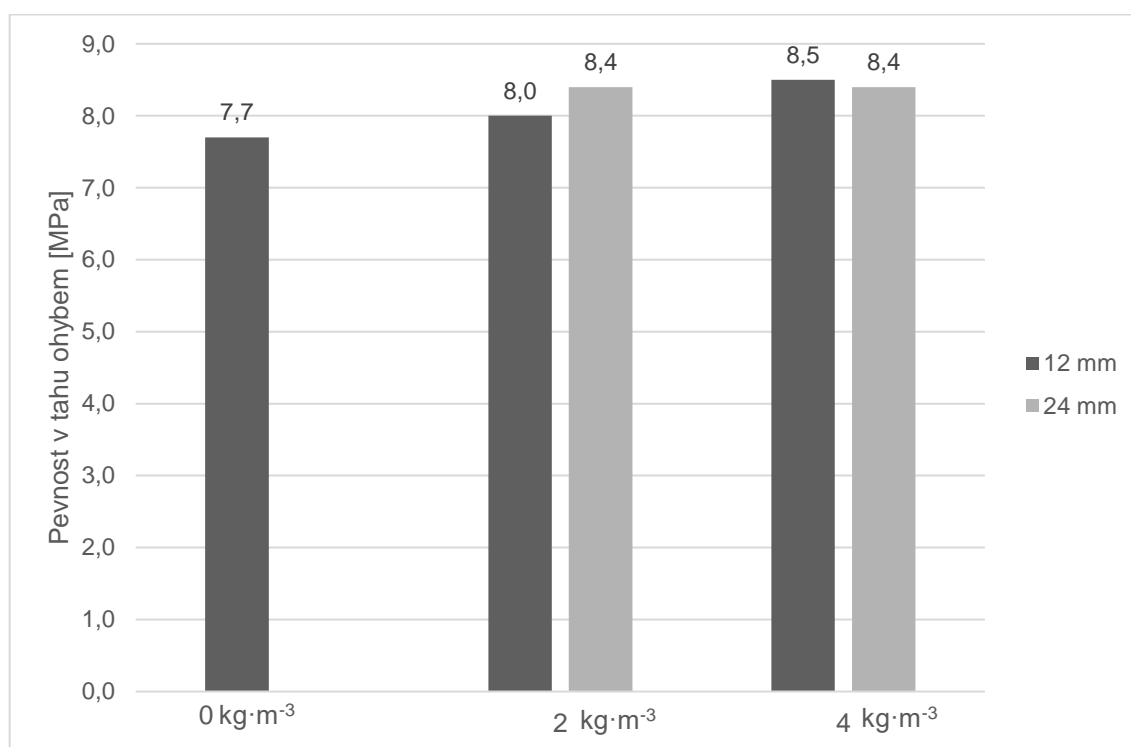
Obrázek 8 – Porušení vzorků při zkoušce pevnosti v tlaku [5]

3.2.2 Pevnost betonu v tahu ohybem

Jak už bylo uvedeno výše, přidání čedičových vláken do betonu, při správném použití a rozmíchání, může zlepšit pevnost v tahu ohybem.

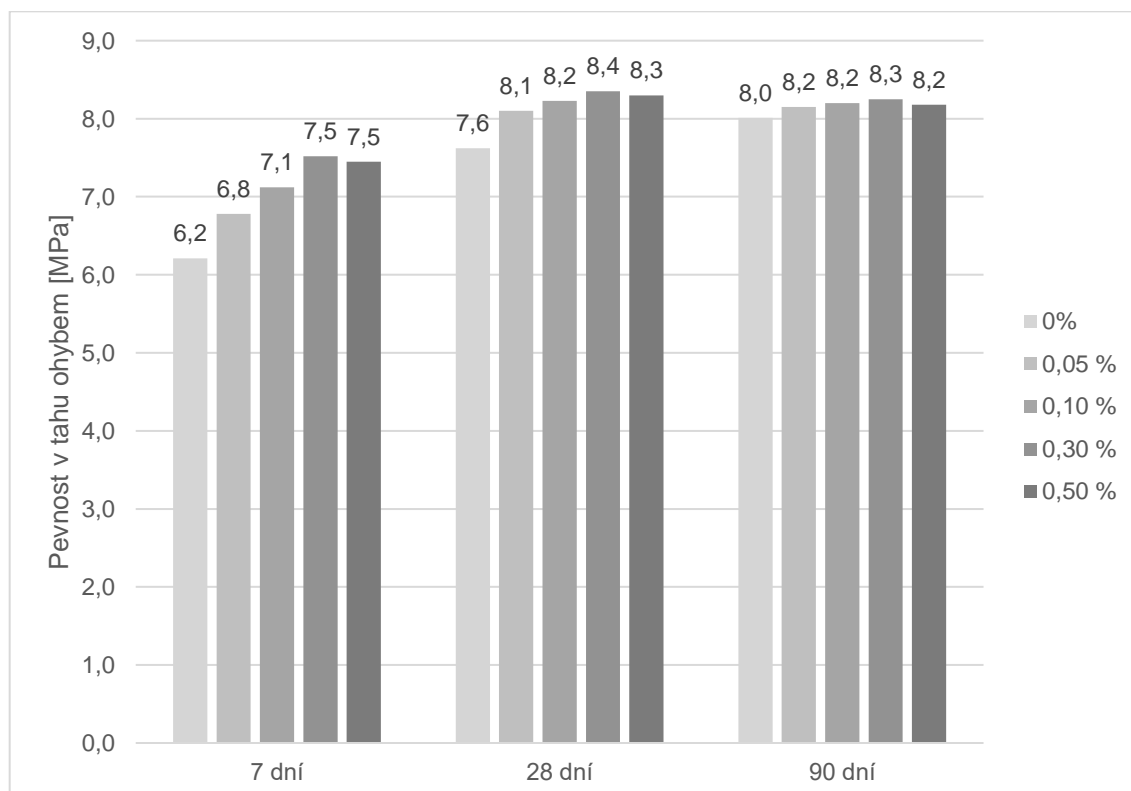
Kabay dosáhl zlepšení pevnosti v tahu ohybem přidáním čedičových vláken. Největší nárůst se ukázal při množství $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ vláken délky 12 mm. U betonů s vlákny délky 24 mm potom dosáhl stejných pevností jak při množství $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tak při množství $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Výsledky lze vidět na grafu 10. [22]

Graf 10 – Pevnost betonu v tahu ohybem s různým množstvím vláken [22]

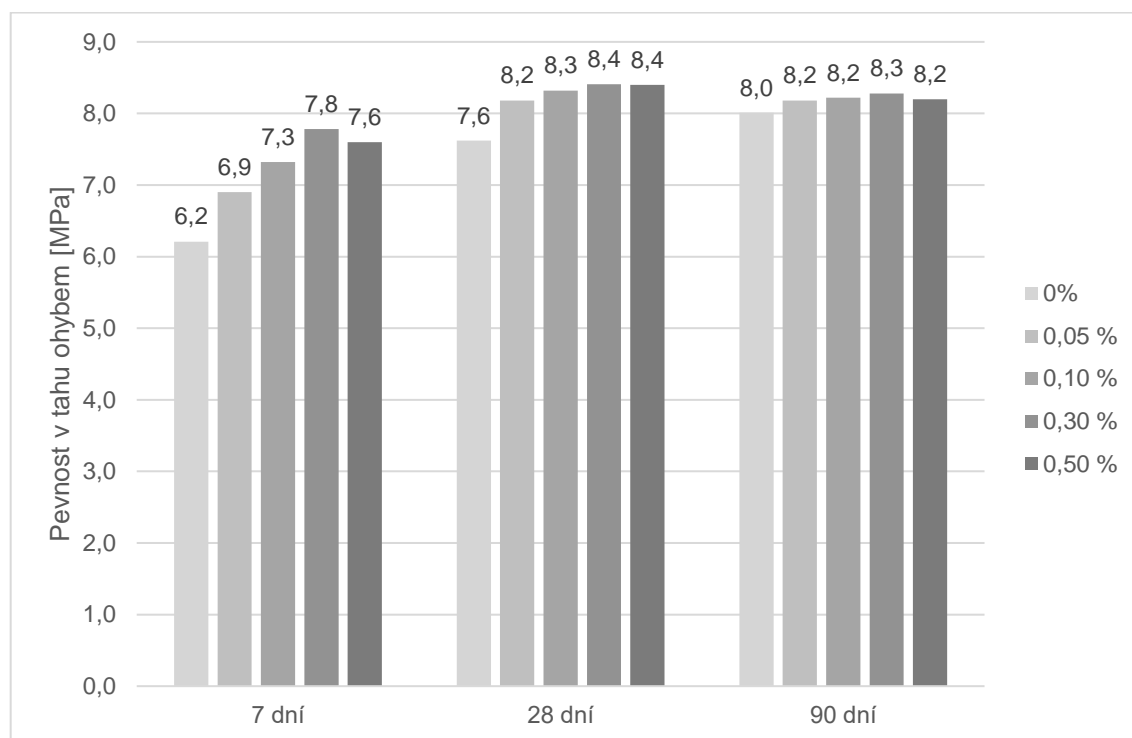


Jiang a kol. zkoušeli pevnost betonu v tahu ohybem. Na grafech 11 a 12 lze vidět vývoj pevností betonu s čedičovými vlákny délky 12 a 22 mm ve stáří 7, 28 a 90 dní.

Graf 11 – Vývoj pevností v tahu ohybem betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 12 mm [21]



Graf 12 – Vývoj pevností v tahu ohybem betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 22 mm [21]



Výše uvedené grafy ukazují, že všechny vzorky betonu s čedičovými vlákny dosahují vyšších pevností v tahu ohybem oproti referenčnímu betonu. Rozdíl v pevnostech je patrnější v ranných stádiích hydratace, ve stáří 7 dní. Zlepšení dosahovalo až 21,1 % u betonu s vlákny dlouhými 12 mm, respektive 25,3 % u betonu s vlákny dlouhými 22 mm. Avšak po 90 dnech je zlepšení 3 % při použití 12mm vláken a 3,4 % při použití 22mm vláken. [21]

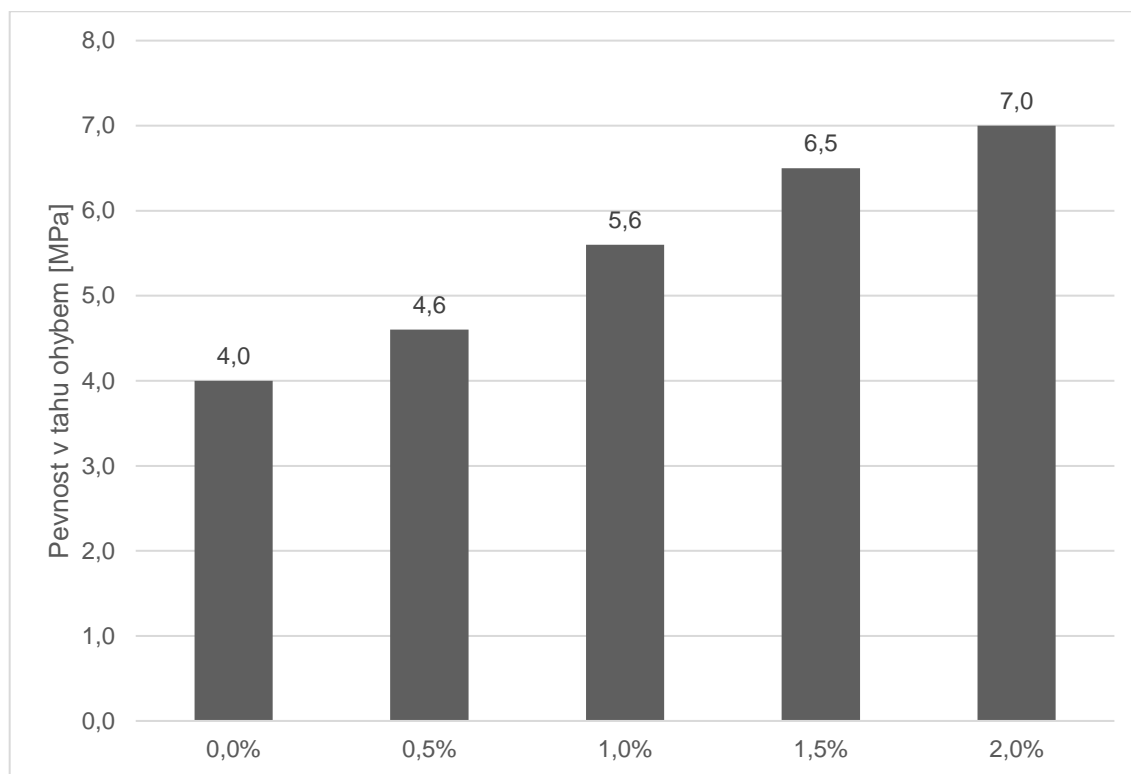
Z toho lze usoudit, že zlepšení pevnosti v tahu ohybem je zřetelnější s větším množstvím vláken. Když se však množství zvýší na 0,5 % z celkového objemu betonu, ukazuje se mírný pokles pevnosti. To je zřejmě způsobeno obtížným rozptýlením vláken v betonu při jejich větším množství. Z tohoto hlediska se jako vhodná ukazuje dávka 0,3 % z celkového objemu betonu. [21]

Kromě toho lze vidět, že beton s vlákny dlouhými 22 mm dosahuje lepší pevnosti v tahu ohybem než ten, který obsahuje vlákna dlouhá 12 mm. Delší vlákna mají lepší soudržnost s betonem a dokáží lépe přemostit počáteční trhliny. [21]

Jalasutram a kol. zkoušeli pevnost v tahu tříbodovým ohybem. Pevnost v tahu ohybem byla výrazně zlepšena přidáním čedičových vláken. V případě vzorků

s obsahem vláken 2 % se jednalo o zlepšení o 75 % oproti betonu bez vláken. Výsledné hodnoty ukazuje graf 13. [5]

Graf 13 – Vliv množství vláken na pevnost v tahu ohybem betonu po 28 dnech [5]



Beton bez vláken vykazuje křehké chování a při ohybovém zatěžování se po vzniku první ohybové trhliny rozpůlí. Avšak beton s čedičovými vlákny má lepší houževnatost a je i po počátečním porušení schopen nést určité zatížení. To je možné do porušení samotných vláken nebo do porušení jejich soudržnosti s cementovou matricí. [5] [21]

3.3 Smršťování a tvorba trhlin

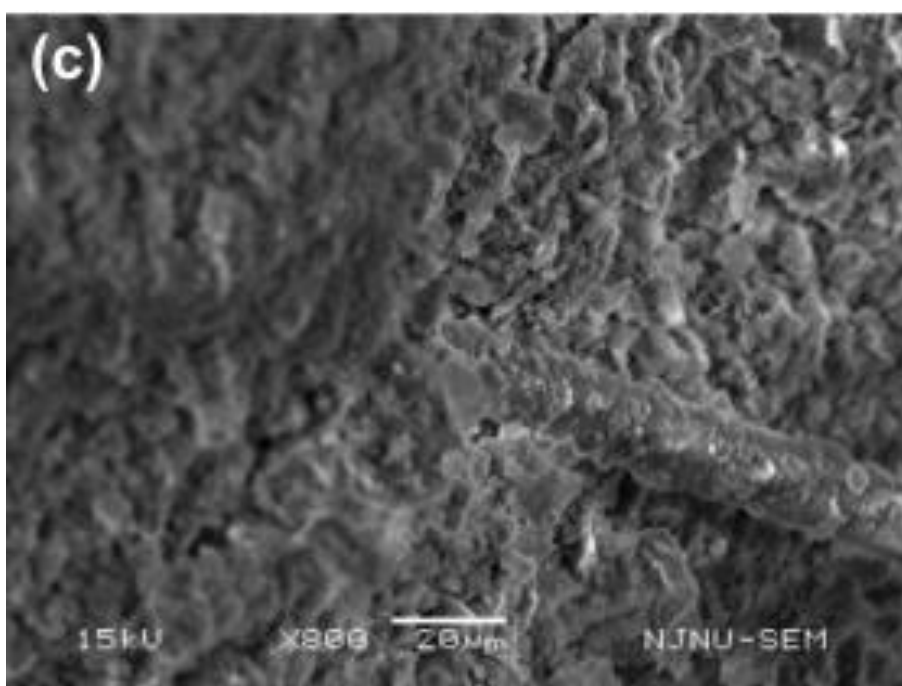
Při zrání betonu dochází v raných fázích ke smršťování. To může vést ke vzniku smršťovacích trhlin. Vlákná, která mají vyšší modul pružnosti než beton, mohou tomuto jevu zabránit. Bylo dokázáno, že čedičová vlákna omezují smršťování a zamezují vzniku smršťovacích trhlin. Vzorky s různým množstvím vláken byly uloženy při teplotě 48 °C a 15% relativní vlhkosti, aby byly vytvořeny podmínky, které zesilují účinky smrštění. Už při dávce 0,1 % vláken z celkového objemu betonu byly zcela odstraněny veškeré smršťovací trhliny. Vzhled vzorků bez vláken a s objemovým množstvím 0,05 a 0,1 % čedičových vláken je možné vidět na obrázku 9. [23]



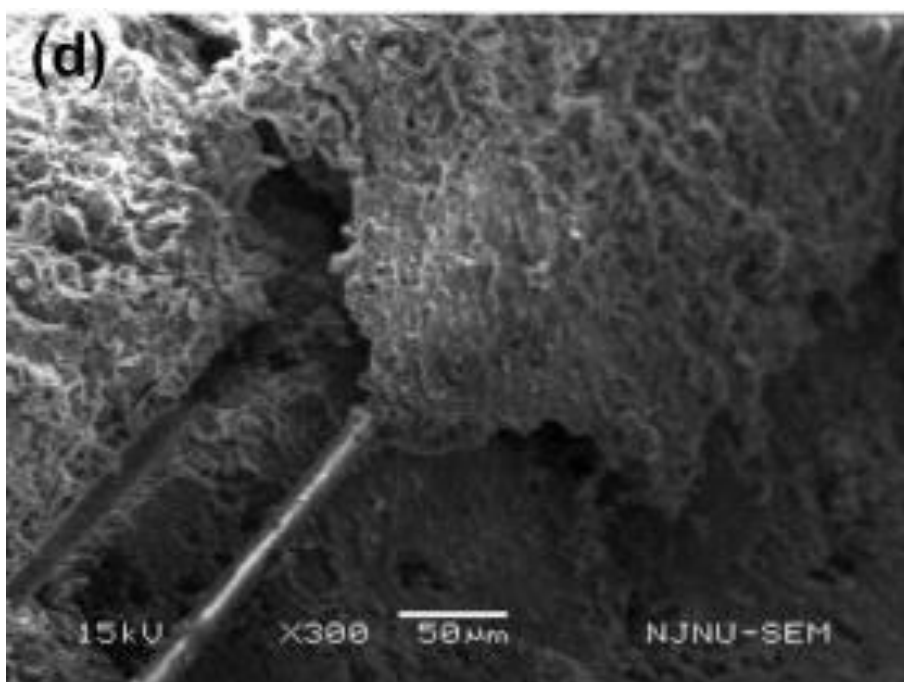
Obrázek 9 – Výskyt smršťovacích trhlin při různých dávkách čedičových vláken [23]

3.4 Mikrostruktura

Vhodným způsobem pro zkoumání mikrostruktury a soudržnosti vláken s cementovou matricí je elektronový rastrovací mikroskop (SEM). Byly provedeny snímky mikrostruktury ve stáří 7 a 28 dní. Na obrázku 10 je beton ve stáří 7 dnů. Je zde patrné, že povrch čedičového vlákna je pokrytý hydratovanou cementovou matricí. Zatímco na obrázku 11, který byl pořízen po 28 dnech, je mezi vlákny a matricí patrný volný prostor. To naznačuje, že v dlouhodobém výhledu může dojít k oddělení vlákna od cementové matrice. Tento jev by mohl mít za následek pokles pevnosti v tlaku i tahových pevností betonu. [21]



Obrázek 10 – Mikrostruktura rozhraní čedičového vlákna a cementové matrice po 7 dnech [21]

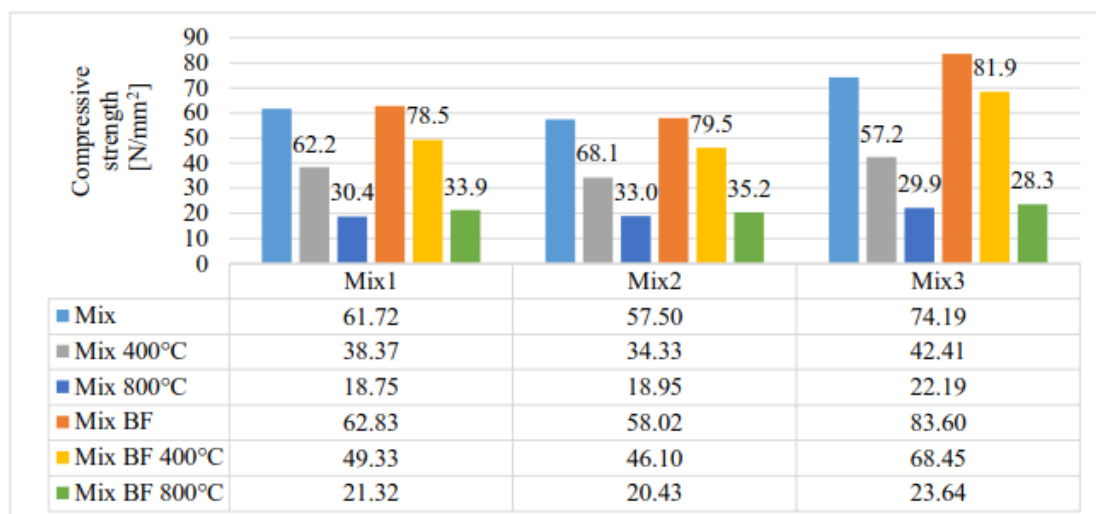


Obrázek 11 – Mikrostruktura rozhraní čedičového vlákna a cementové matrice po 28 dnech [21]

3.5 Požární odolnost

Bodnárová a Nováková ověřovali vlastnosti betonu s čedičovými vlákny po vystavení vysokým teplotám. Byly namíchány celkem tři směsi betonu s množstvím cementu 315 (Mix1), 340 (Mix2) a 450 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Mix3) bez vláken a tři směsi se stejnými množstvími betonu s čedičovými vlákny v množství 2 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Mix1BF, Mix2BF, Mix3BF). Přidání čedičových vláken ukázalo významné zlepšení požární odolnosti při zahřátí vzorků na teplotu 400 °C. Výsledky po zahřátí na teplotu 800 °C ukazují značný pokles pevnosti i u betonu s čedičovými vlákny. Degradace v cementové pastě při teplotách nad 400 °C je tak vysoká, že přídavek čedičových vláken nemá žádný vliv. Výsledky přehledně ukazuje graf 14. [16]

Graf 14 – Pevnost v tlaku betonu s čedičovými vlákny a bez vláken po vystavení vysokým teplotám [16]



(Compressive strenght – pevnost v tlaku)

4 Vliv vysokých teplot na beton a jeho složky

Vliv vysokých teplot na beton se zkoumá z důvodu jeho požární odolnosti. Teploty při požáru mohou dosáhnout teplot až 1 100 °C v budovách nebo 1 350 °C v tunelech, což vede k vážnému poškození ve struktuře betonu. K poškozením, která ohrožují únosnost betonového prvku, ovšem dochází už při nižších teplotách. [24]

Odolnost betonu proti působení vysokých teplot lze popsat jako schopnost udržet si své vlastnosti, zejména pak soudržnost a ochránit ocelovou výztuž. Závisí zejména na složení betonu, hutnosti, homogenitě a intenzitě teplotního zatížení. Beton je kompozitní materiál složený nejméně ze dvou složek, a to cementového tmelu a kameniva. V betonu se navíc používají různé druhy kameniva, které obsahují různé minerály, jejichž chování při vysokých teplotách je rozdílné. Tyto skutečnosti komplikují zkoumání chování betonu při zatížení vysokými teplotami. [24] [25]

Při působení se zhoršují jeho mechanické vlastnosti, modul pružnosti a objemová stabilita. Mohou se objevit i strukturální poruchy. Dochází ke zhroucení struktury cementového tmelu. [25] [26]

Tabulka 6 – Změny ve struktuře betonu, ke kterým dochází při zahřívání [27]

Rozsah teplot	Změny ve struktuře betonu
20-200 °C	Uvolnění fyzikálně vázané a kapilární vody. 80-150 °C dehydratace ettringitu. 150-170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Počátek dehydratace CSH gelu.
300-400 °C	Praskání křemičitého kameniva (350 °C). Kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody.
400-500 °C	Rozklad portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.
500-600 °C	Přeměna křemene z fáze β na α (573 °C) v kamenivu.
600-800 °C	Druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba β - C_2S .
800-1 000 °C	840 °C – rozklad dolomitického vápence. 930-960 °C – rozklad kalcitu $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Začátek vzniku keramické vazby, která nahrazuje hydraulické vazby, doprovázeno vznikem oxidu uhličitého.
1 000-1 200 °C	Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). 1 050 °C – tavení čediče.
1 300 °C	Celkový rozklad betonu, tavení některých složek.

4.1.1 Cementová pasta

Při zahřívání cementové pasty dochází k jejímu vysoušení. Voda se z materiálu postupně odpařuje. Jako první odchází volná voda, poté kapilární následovaná fyzikálně vázanou vodou. Jako poslední odchází chemicky vázaná voda z hydratačních produktů. Mechanické vlastnosti cementové pasty jsou silně ovlivněny chemickými vazbami a soudržností mezi „listy“ CSH gelu. Předpokládá se, že se jedná až 50 % pevnosti cementové pasty. Odpařování vody z míst mezi „listy“ CSH gelu tedy silně ovlivňuje mechanické vlastnosti cementové pasty. [24]

Při zkoumání změn mikrostruktury zahřívání cementové pasty bylo zjišťováno chování hlavních produktů hydratace cementu. Už před dosažením teploty 100 °C se jako první rozkládá primární ettringit. Dehydratace CSH gelu je postupná a dochází k ní od začátku zahřívání. Při teplotách mezi 500-550 °C se rozkládá minerál portlandit dle následující rovnice $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O \uparrow$, která vysvětluje nárůst množství CaO v cementové pastě při teplotách kolem 550 °C. Dehydratací CSH gelu dochází ke snížení jeho objemu a ke vzniku pórů. [24]

Při teplotách nad 650 °C dochází k rozkladu $CaCO_3$, který vzniká při karbonataci. Nad 750 °C dojde k postupné přeměně dehydratovaného CSH gelu na nesosilikát, který se svou strukturou podobá C_2S . K rozkladu dehydratovaného CSH gelu dochází při teplotách vyšších než 800 °C. Hlavními složkami cementového tmelu, který byl vystaven teplotě nad 800 °C, jsou CaO, larnit, wollastonit, brownmillerit a gehlenit. [25]

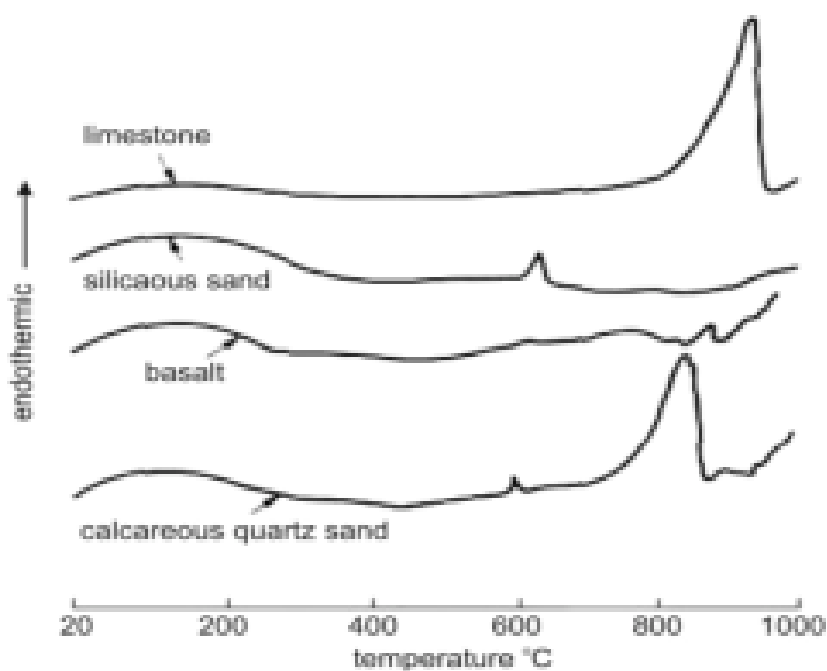
Pokud dochází k zahřívání ve vlhkém a uzavřeném prostředí, může dojít k hydrotermálním reakcím k tzv. autoklávování. Při tomto procesu dochází k fyzikálním a chemickým změnám, které vedou ke zpevnění cementové pasty. Povaha těchto fázových změn závisí zejména na mineralogickém složení cementu, poměru mezi CaO a SiO_2 , množství jemných částic a výši vzniklé teploty a tlaku. [24]

Při zahřívání cementové pasty s poměrem CaO/ SiO_2 kolem 1,5 a při teplotě vyšší než 100 °C vznikají různé formy křemičitanu vápenatého, které jsou obecně vysoce porézní a mají nízkou pevnost. Když je poměr CaO/ SiO_2 blízko 1,0 a teplota je vyšší než 150 °C může vznikat tobermoritový gel. Při teplotách mezi 180-200 °C vznikají další silikáty jako xonolit a hillebrandit. [24]

4.1.2 Kamenivo

Kamenivo zabírá přibližně 70-80 % objemu betonu, a proto velmi silně ovlivňuje jeho tepelné chování. Tepelná stabilita kameniva je charakterizována jeho chemickou a fyzikální stabilitou za zvýšených teplot. Tepelně odolné kamenivo by nemělo vykazovat žádné hmotnostní změny ani reakce při zvýšené teplotě. [24]

Graf 15 – DTA analýza čtyř typů kameniva zahříváných rychlostí 10 °C/min [24]

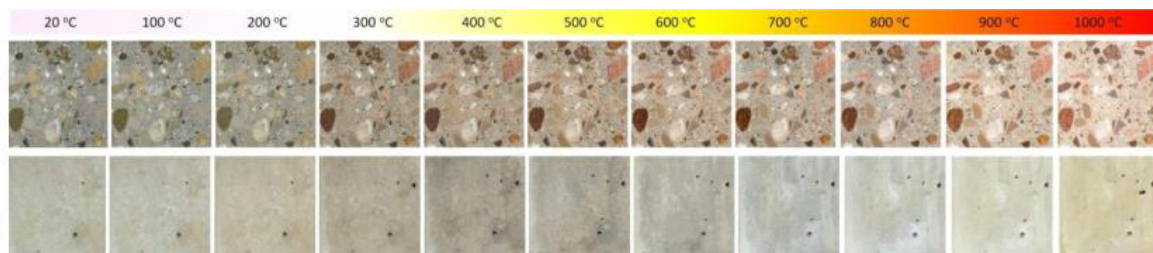


(limestone – vápenec, silicaous sand – křemičitý písek, basalt – čedič, calcareous quartz sand – vápenato-křemenný písek)

Tepelnou stabilitu kameniva ovlivňuje jeho mineralogické složení. Kameniva, které obsahují křemen ovlivňuje modifikační přeměna křemene z β -křemene na α -křemen při teplotě 573 °C, při které dochází ke zvýšení objemu. Vápencová kameniva jsou stabilní do teploty 600 °C, po které dochází k rozkladu na CaO a CO₂. Zahřívání na ještě vyšší teploty vede k tavení kameniva. Teplota tavení se opět liší podle mineralogického složení. Vyvřelé horniny se taví při teplotách vyšších než 1 000 °C, teplota tavení žuly je 1 210-1 250 °C, zatímco čedič se taví při teplotě 1 050 °C. [24]

Při vizuální makroskopickém posouzení tepelně zahříváného kameniva lze kromě rozpadu zrn pozorovat i barevnou změnu kameniva. Při teplotách 250-300 °C se křemenné kamenivo zbarvuje do růžova až červena v důsledku oxidace sloučenin železa. Červené zbarvení se zvyrazňuje až do teploty 600 °C. Při teplotách 450-

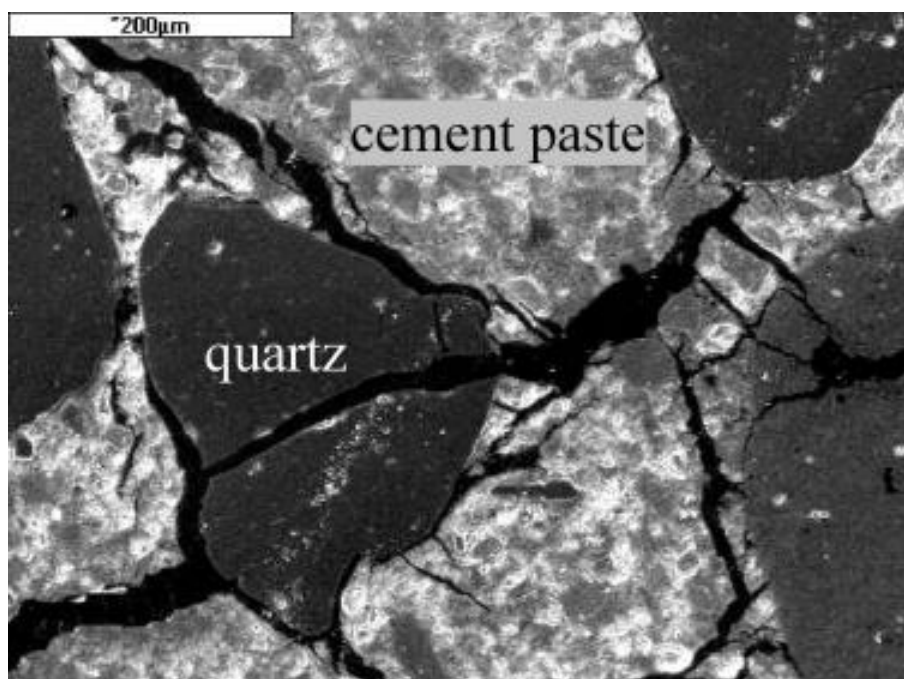
500 °C se křemenné kamenivo může zbarvit do šeda až bíla. Mezi teplotami 800 a 1 000 °C se vápenatá kameniva zbarvují do bíla. [25] [28]



Obrázek 12 – Barevná změna povrchu betonu a kameniv při působení různých teplot [24]

4.1.3 Soudržnost kameniva a cementové pasty

Z výše uvedených poznatků je zřejmé, že zahřívání betonu ovlivňuje cementový tmel a zvětšuje objem kameniva. Z toho důvodu je vazba na rozraní kameniva a cementové pasty nejslabším místem v betonu při vystavení působení vysokých teplot. Do značné míry je poškození betonu způsobeno tvorbou trhlin, ke které dochází v důsledku rozdílného tepelného chování kameniva a cementové pasty. [24]



Obrázek 13 – Mikrostruktura betonu zahřátého na 600 °C [24]

(quartz – křemen, cement paste – cementová pasta)

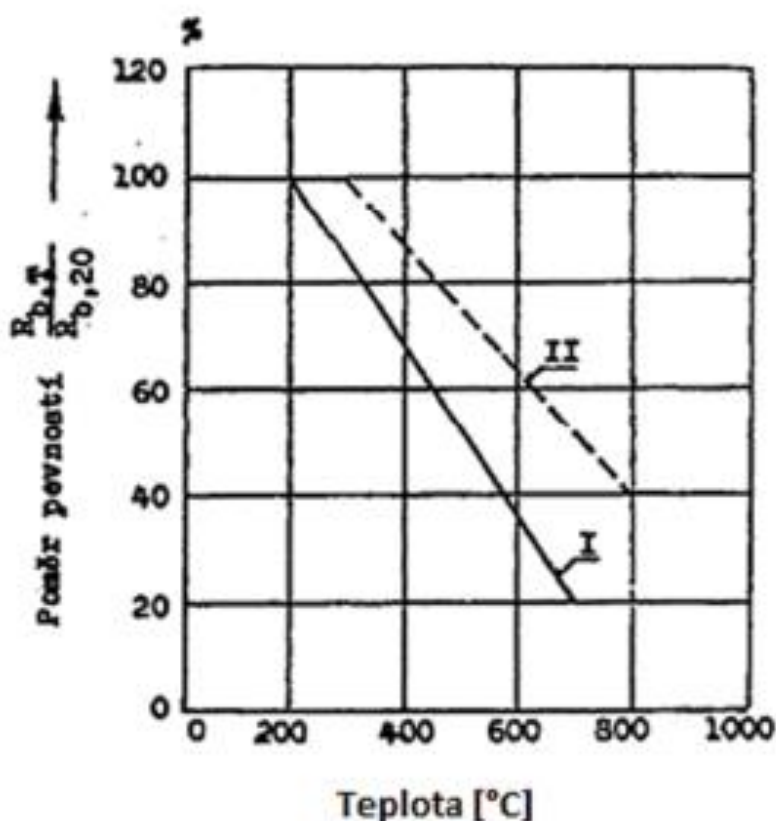
Obrázek 13 ukazuje snímek mikrostruktury betonu zahřátého na 600 °C z elektronového rastrovacího mikroskopu. Na obrázku jsou zřejmé trhliny na

rozhraní cementové matrice a kameniva. Trhliny procházejí také kamenivem, což ukazuje tendenci některých druhů křemenného kameniva praskat při teplotě 350 °C. [24]

4.1.4 Změna pevnosti v tlaku

Působení vysoké teploty na beton snižuje pevnost v tlaku. K mírnému snížení pevnosti dojde už při zahřátí na 120 °C. Mezi teplotami 100-300 °C dochází k mírnému nárůstu pevnosti, k tzv. „kvazizpevnění“. To může být způsobeno urychlením hydratačních procesů zejména u ne tolik vyzrálého betonu. Při vyšších teplotách dochází k dehydrataci CSH gelu, rozkladu portlanditu a k porušení soudržnosti mezi cementovým tmelem a kamenivem v důsledku rozdílné teplotní roztažnosti těchto dvou složek. To má za následek postupné snižování pevnosti v tlaku. [25]

Graf 16 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku [29]



(I – hutný beton, II – lehký beton)

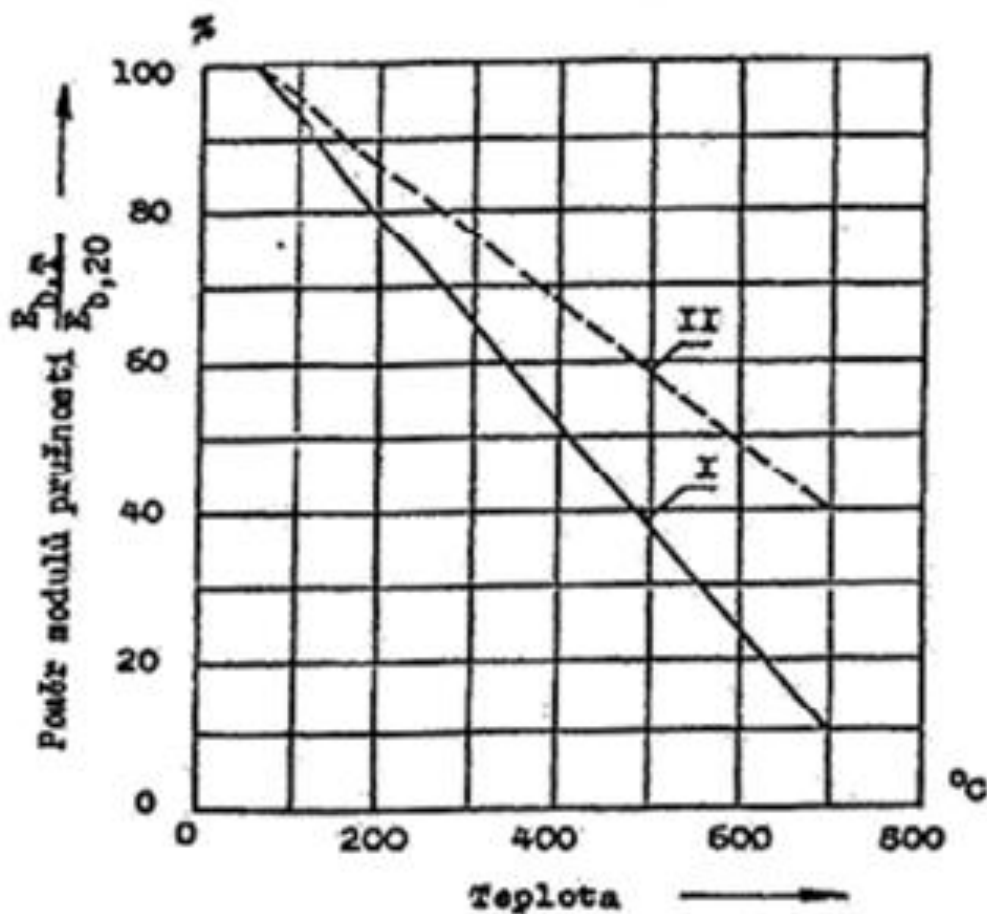
4.1.5 Změna pevnosti v tahu

Většina výsledků zkoušení pevnosti betonu v tahu je získána až po ochlazení. Důvodem jsou technické problémy při měření okamžitého napětí ještě zahřátých vzorků. Seznámení se změnami pevnosti v tahu v závislosti na teplotě je však velmi důležité pro pochopení procesu odprýskávání. K tomu dochází, když vzniklé vnitřní napětí, které je představováno tlakem vnitřní páry, překročí pevnost betonu v tahu. [25]

4.1.6 Změna modulu pružnosti

Modul pružnosti betonu se při vystavení vysokým teplotám snižuje. Na rozdíl od druhu cementu má na změnu modulu pružnosti vliv výběr kameniva. Betony s hutným kamenivem vykazují výrazný pokles modulu pružnosti. U betonů s lehkým kamenivem k tak výraznému poklesu nedochází. [25]

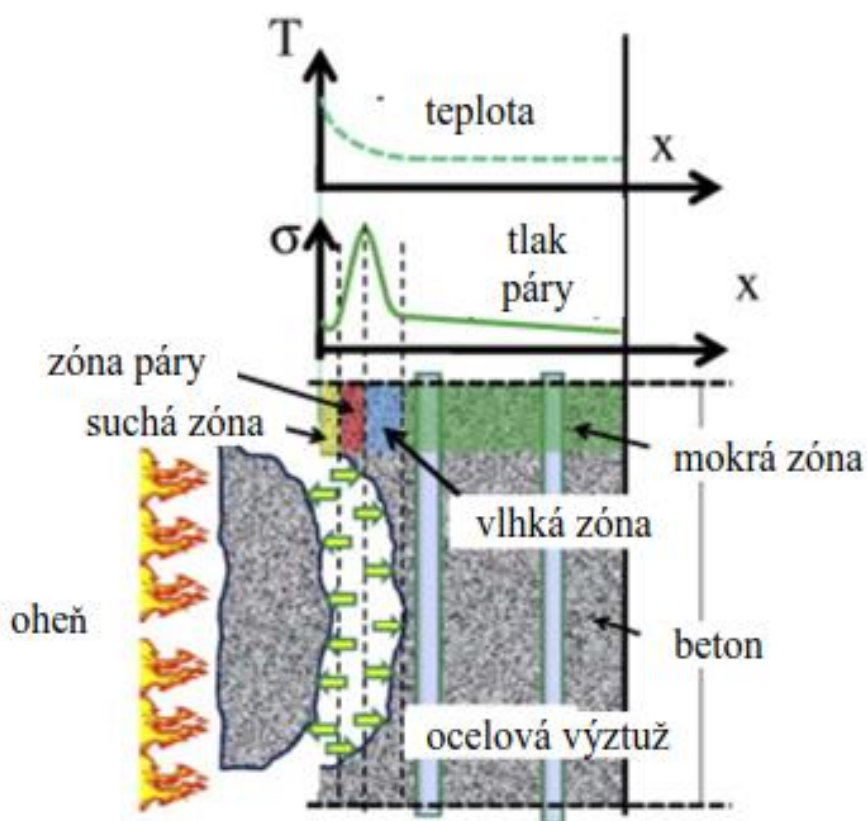
Graf 17 – Vliv teploty na modul pružnosti betonu [29]



(I – hutný beton, II – lehký beton)

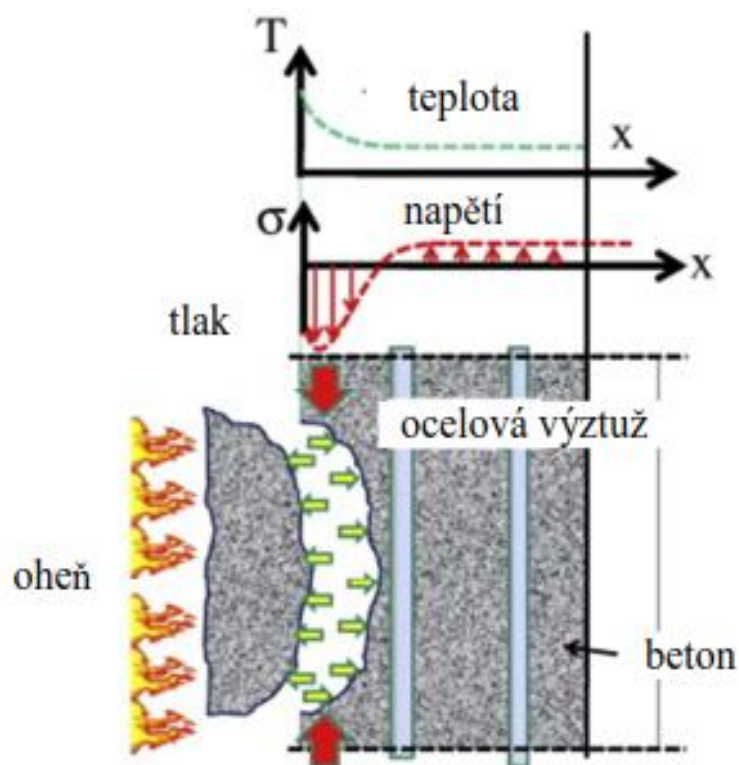
4.1.7 Explosivní odprýskávání

Explozivní odprýskávání je jev, ke kterému dochází při vystavení betonu působení vysokých teplot. Nejdůležitějšími faktory jsou vlhkost a mikrostruktura betonu. Pokud je struktura betonu spíše otevřená, může pára, která vzniká z kapalně vody obsažené v betonu, volně unikat. Pokud je však struktura spíše uzavřená, pára nemůže unikat a její tlak může překročit hodnotu 3 MPa. V důsledku vysokého vnitřního tlaku může dojít k odtržení malé vrstvy cementového kamene u povrchu betonu neboli k tzv. explozivnímu odprýsknutí. [25]



Obrázek 14 – Explosivní odprýsknutí betonu v důsledku vysokého tlaku vodní páry [30]

Jiné vysvětlení explozivního odprýsknutí betonu je následující. Jak roste teplota povrchu betonu, teplotní gradient vede k distribuci napětí v tlaku ve směru rovnoběžném s povrchem betonu, rozdělení vede ke vzniku tahových napětí v kolmém směru. Pokud hodnoty tahového namáhání jsou vyšší než mez pevnosti v tahu, dojde k explozivnímu odprýsknutí betonu. [25] [30]



Obrázek 15 – Explosivní odprýsknutí betonu v důsledku teplotního gradientu [30]

4.1.8 Rozptýlená výztuž

Jednou z možností, jak zvýšit odolnost betonových konstrukcí vůči vysokým teplotám, je použití rozptýlené výztuže. Pro tyto účely se používají polypropylenová vlákna. Teplota tání polypropylenu se pohybuje okolo 160 °C. Při těchto teplotách vlákna vyprchají a vytvoří se otevřená pórová struktura betonu. Póry může unikat vodní pára a zamezí se tak poškození mikrostruktury betonu. [25]

Ocelová vlákna mohou také zamezit explozivnímu odprýskávání a poškození betonu. Fungují ovšem na jiném principu. Pokud tlak vodních par v betonu dosáhne takové meze, že překročí pevnost v tahu betonu, dojde k odtržení povrchových vrstev. Přídavek ocelových vláken může zvýšit pevnost betonu v tahu a tomuto jevu zamezit. [25]

Kromě výše uvedeného experimentu, který provedla Nováková a Bodnárová [16] dostupná literatura dosud podrobně nezpracovává problematiku efektu čedičových vláken na vlastnosti betonu při působení vysokých teplot. Podle jedné z teorií by však mohla působit obdobně jako jemná ocelová vlákna. Nejednalo by se tedy o vytvoření pórové struktury ale o vyztužení porušené cementové matrice

nedegradovanými čedičovými vlákny. Tomuto se mimo jiné bude věnovat experimentální část této práce.

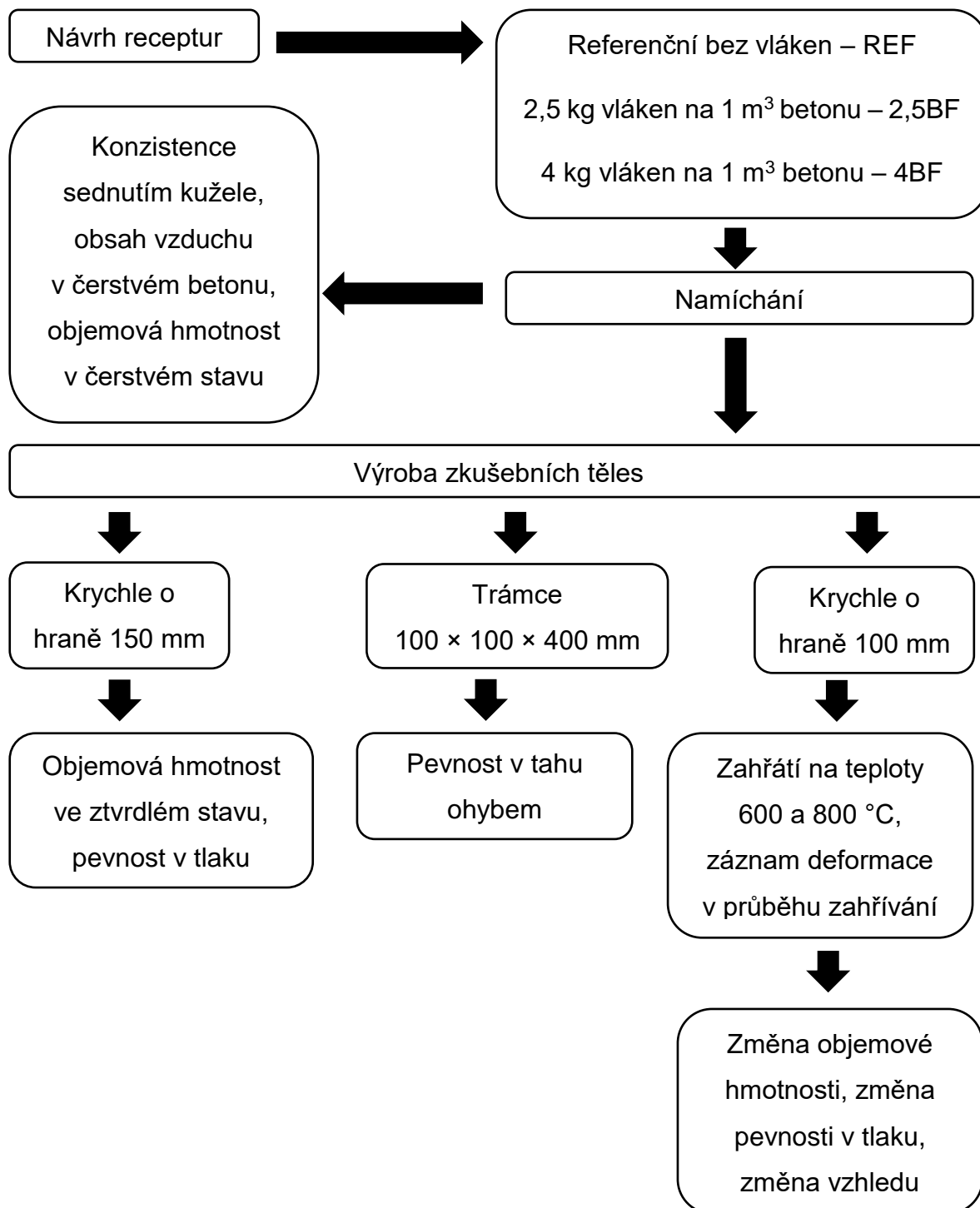
III. CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo ověřit vlastnosti betonu s čedičovými vlákny. Sledován byl vliv na vlastnosti čerstvého betonu – zpracovatelnost a obsah vzduchu v čerstvém betonu. Na ztvrdlém betonu byla sledována pevnost v tahu ohybem a pevnost v tlaku betonu. Bylo provedeno zatížení betonu s vlákny na teploty 600 a 800 °C a následně byl popsán efekt čedičových vláken na vlastnosti po působení těchto teplot. Byly hodnoceny změny fyzikálních vlastností betonu a změny vzhledu. Úkolem práce bylo také ověřit přítomnost čedičových vláken v betonu pomocí optického mikroskopu.

IV. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5 Etapa I

5.1 Schéma prováděných zkoušek



5.2 Charakterizace vstupních surovin

5.2.1 Cement

- Portlandský cement CEM I 42,5 od společnosti Českomoravský cement, a.s. ze závodu Mokrý.
- Měrný povrch cementu podle EN 196-6 dle Blaina je $374 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

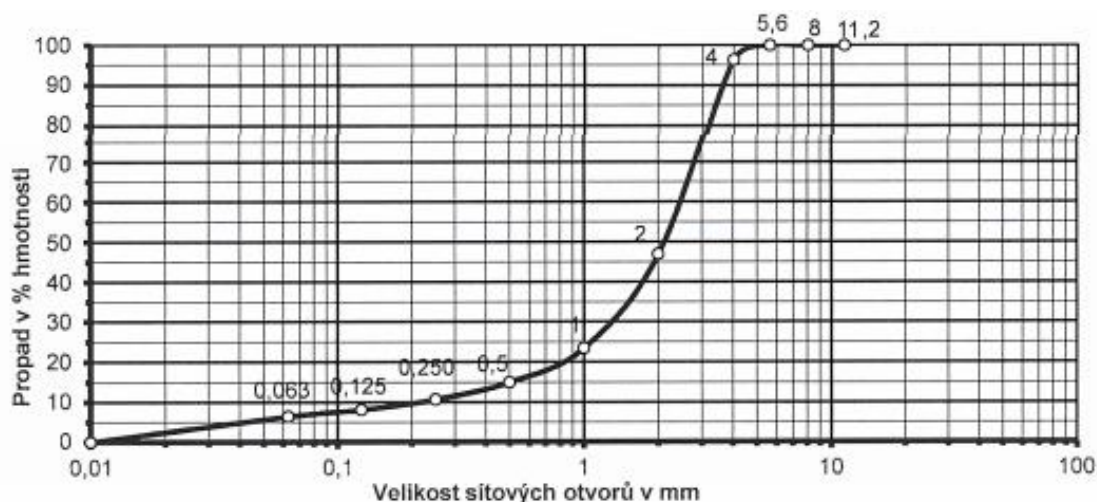
Tabulka 7 – Chemické vlastnosti použitého cementu [31]

Parametr		Průměrná hodnota
Obsah [%]	CaO	64,2
	SiO ₂	19,5
	Al ₂ O ₃	4,7
	Fe ₂ O ₃	3,2
	MgO	1,3
	SO ₃	3,2
	Cl ⁻	0,047
	K ₂ O	0,78
	Na ₂ O	0,09
Na ₂ O ekvivalent [%]		0,6
Nerozpustný zbytek [%]		0,8
Ztráta žháním [%]		3,2

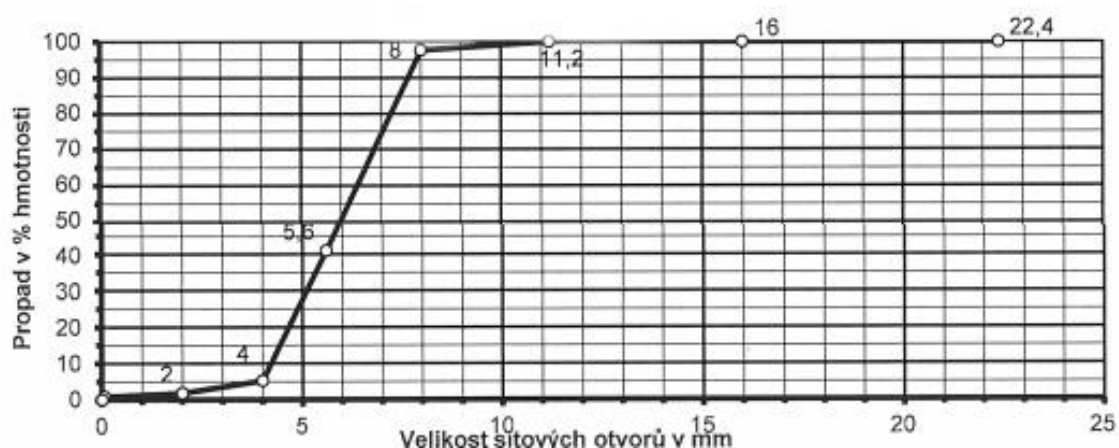
5.2.2 Kamenivo

- Čedičové kamenivo ve frakcích 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm z kamenolomu Bílčice od společnosti Kamenolomy ČR, s.r.o.

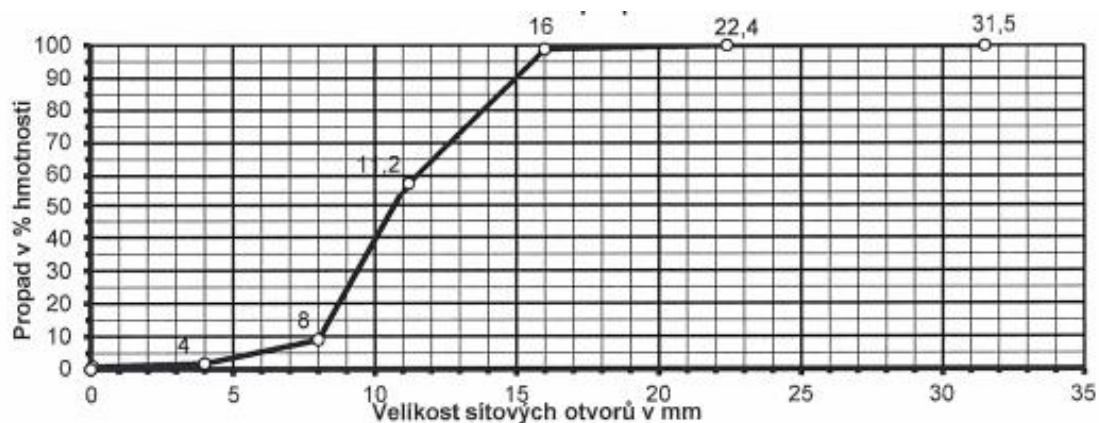
Graf 18 – Křivka zrnitosti použitého čedičového kameniva frakce 0-4 mm [32]



Graf 19 – Křivka zrnitosti použitého čedičového kameniva frakce 4-8 mm [32]



Graf 20 – Křivka zrnitosti použitého čedičového kameniva frakce 8-16 mm [32]



Tabulka 8 – Vlastnosti použitého čedičového kameniva [32]

Frakce kameniva	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [kg·m ⁻³]	Sypná hmotnost setřeseného kameniva [kg·m ⁻³]
0-4 mm	2 948	1 650	2 001
4-8 mm	2 943	1 349	1 605
8-16 mm	2 935	1 418	1 656



Obrázek 16 – Čedičové kamenivo frakce 0-4 mm



Obrázek 17 – Čedičové kamenivo frakce 4-8 mm



Obrázek 18 – Čedičové kamenivo frakce 8-16 mm

5.2.3 Plastifikátor

- Superplastifikátor na bázi polykarboxylátů STACHEMENT 2050 (FM) od společnosti Stachema CZ, s.r.o.

5.2.4 Vlákna

- Čedičová vlákna o průměru 17 μm a délce 24,4 mm od společnosti Basaltex.

Tabulka 9 – Vlastnosti použitých čedičových vláken [16] [33]

Parametr	Hodnota
Průměr [μm]	17
Délka [mm]	24,4
Měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2 670
Teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]	1 350
Pevnost v tahu [MPa]	2 800-4 800
Modul pružnosti [GPa]	86-90



Obrázek 19 – Čedičová vlákna

5.3 Receptury

5.3.1 Směs REF

Referenční směs bez vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného čedičového kameniva frakce 0-4 mm, hrubého čedičového kameniva frakcí 4-8 a 8-16 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 10 – Složení směsi REF

Složky směsi	Množství [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
CEM I 42,5	340
Drobné čedičové kamenivo 0-4 mm	1 217
Hrubé čedičové kamenivo 4-8 mm	391
Hrubé čedičové kamenivo 8-16 mm	537
Voda	160
Plastifikátor STACHEMENT 2050 (FM)	3,4

5.3.2 Směs 2,5BF

Směs s 2,5 kg čedičových vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného čedičového kameniva frakce 0-4 mm, hrubého čedičového kameniva frakcí 4-8 a 8-16 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 11 – Složení směsi 2,5BF

Složky směsi	Množství [kg·m ⁻³]
CEM I 42,5	340
Drobné čedičové kamenivo 0-4 mm	1 217
Hrubé čedičové kamenivo 4-8 mm	391
Hrubé čedičové kamenivo 8-16 mm	537
Voda	160
Plastifikátor STACHEMENT 2050 (FM)	3,4
Čedičová vlákna Basaltex BCS17-25.4-KV13	2,5

5.3.3 Směs 4BF

Směs s 2,5 kg čedičových vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného čedičového kameniva frakce 0-4 mm, hrubého čedičového kameniva frakcí 4-8 a 8-16 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 12 – Složení směsi 4BF

Složky směsi	Množství [kg·m ⁻³]
CEM I 42,5	340
Drobné čedičové kamenivo 0-4 mm	1 217
Hrubé čedičové kamenivo 4-8 mm	391
Hrubé čedičové kamenivo 8-16 mm	537
Voda	160
Plastifikátor STACHEMENT 2050 (FM)	3,4
Čedičová vlákna Basaltex BCS17-25.4-KV13	4

5.4 Příprava a ošetřování zkušebních vzorků

Beton byl namíchán v laboratorní míchačce. Po ověření vlastností v čerstvém stavu byla vytvořena zkušební tělesa. Z každé směsi byly vytvořeny 3 krychle o hraně 150 mm na ověření pevnosti v tlaku, 3 trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm na ověření pevnosti v tahu ohybem a 6 krychlí o hraně 100 mm, z nichž 3 byly zahřáty na teplotu 600 °C a zbylé 3 na teplotu 800 °C. Vzorky byly hutněny na vibračním stole a poté uloženy 28 dní ve vlhkém prostředí. Před zahřátím byly vzorky uloženy na 24 hodin v sušárně při teplotě 100 °C. Vzorky byly vysušeny z důvodu omezení možného explozivního odprýskávání a k omezení poškození žáruvzdorné vyzdívkou pece vlhkostí.



Obrázek 20 – Použitá laboratorní míchačka

5.5 Popis prováděných zkoušek a měření

5.5.1 Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Podstatou zkoušky objemové hmotnosti v čerstvém stavu je stanovení objemu nádoby, zvážení prázdné nádoby a zvážení nádoby po naplnění materiálem. Objemová hmotnost je stanovena podle vztahu:

$$D_{\text{čB}} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

kde:

$D_{\text{čB}}$ je objemová hmotnost čerstvého betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

m_1 hmotnost prázdné nádoby [kg],

m_2 hmotnost plné nádoby [kg],

V objem nádoby [m^3].

Výsledek objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

5.5.2 Konzistence – zkouška sednutím

Konzistence byla stanovena podle normy ČSN EN 12 350-2: „Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím“. Podstatou zkoušky je naplnění Abramsova kužele čerstvým betonem ve třech vrstvách, kdy se každá zhutní v celém průřezu 25 vpichy propichovací tyčí. Po zvednutí komolého kužele nahoru se změří vzdálenost, o kterou poklesl beton. Ta udává konzistenci betonu. [34]

Tabulka 13 – Třídy konzistence sednutím kužele [34]

Třída konzistence	Sednutí kužele [mm]
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

5.5.3 Obsah vzduchu v čerstvém betonu

Obsah vzduchu byl stanoven tlakoměrnou metodou podle normy ČSN EN 12 350-7: „Obsah vzduchu – Tlakové metody“. Podstatou zkoušky je naplnění tlakové nádoby ve třech vrstvách, kdy se každá zhutní v celém průřezu 25 vpichy propichovací tyčí. Po zhutnění každé vrstvy se na stěny nádoby poklepe gumovou paličkou pro vypuzení vzduchových bublin. Zhutněný beton se zarovná a neprodyšně se nasadí víko nádoby s měřicím přístrojem. Zkušební přístroj se zaplní vodou tak, že se voda vstříkuje pryžovou stříčkou do ventilu A nebo B dokud nevytéká z druhého ventilu. Uzavře se ventil na vypouštění vzduchu ze vzduchové komory. Opět se poklepe paličkou pro odstranění vzduchových bublin. Do vzduchové komory se pumpuje vzduch, dokud ručička tlakoměru neukazuje počáteční hodnotu tlaku. Uzavřou se ventily A a B a otevře se hlavní ventil vzduchu. Ostře se poklepe na boční stěny nádoby a odečte se hodnota tlaku na tlakoměru, která odpovídá hodnotě obsaženého vzduchu v procentech. Před sejmutím víka se otevřou ventily A a B aby se uvolnil tlak. [35]

5.5.4 Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu byla stanovena podle normy ČSN EN 12 390-7: „Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu“. Podstatou je změření všech rozměrů daného vzorku a jeho zvážení. Objemová hmotnost se potom vypočte podle vztahu:

$$D_{zB} = \frac{m}{V}$$

kde:

D_{zB} je objemová hmotnost zkušební tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

m hmotnost zkušební tělesa [kg],

V objem zkušební tělesa [m^3].

Výsledek objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [36]

5.5.5 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena podle normy ČSN EN 12 390-3: „Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Zkouška byla prováděna na krychlích o rozměru 150 mm. Podstatou je zatěžování krychle ve zkušebním lisu konstantní rychlostí zatěžování až do porušení. Krychle se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Síla při porušení se zaznamená a pevnost v tlaku se vypočte podle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde:

f_c je pevnost v tlaku [MPa],

F maximální zatížení při porušení [N],

A_c průřezová plocha zkušební tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm^2].

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa. [37]

5.5.6 Pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu ohybem byla stanovena podle ČSN EN 12 390-5: „Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Zkouška byla prováděna na trámci o rozměrech $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$. Podstatou zkoušky je zatěžování trávce ohybovým momentem od zatížení přenášeného prostřednictvím horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků. Nejvyšší dosažené zatížení se zaznamená a pevnost v tahu ohybem se vypočte podle vztahu:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 d_2^2}$$

kde:

f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa],

F maximální zatížení [N],

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm],

d_1 a d_2 rozměry příčného řezu tělesa [mm].

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa. [38]

5.5.7 Zahřátí betonu na vysoké teploty

Vzorky všech směsí byly zahřáty na teploty 600 a 800 °C. K zahřátí byla použita pec od společnost Clasic, s.r.o., s měřicím zařízením a počítačovým programem pro záznam průběhu teploty a deformací v reálném čase. Jako vzorky byly použity krychle o hraně 100 mm. Po zahřátí byla vyhodnocena změna objemové hmotnost a změna pevnost v tlaku. Vzorky byly vizuálně posouzeny.

Vzorky byly zahřívány rychlostí 10 °C za minutu. Výdrž teploty 600 °C, respektive 800 °C byla 60 minut. Poté byly vzorky volně ochlazovány a experiment byl ukončen po 24 hodinách.

Pokud se pevnost v tlaku zjišťuje na tělese jiného než základního rozměru, je vhodné zjištěnou pevnost převést na pevnost betonu základního tělesa násobením experimentálně zjištěnými převodními součiniteli pro rozměr. Pro krychli o hraně 100 mm je hodnota součinitele $K_{c,cube} = 0,95$. [37]



Obrázek 21 – Použitá laboratorní pec se zařízením na měření deformace

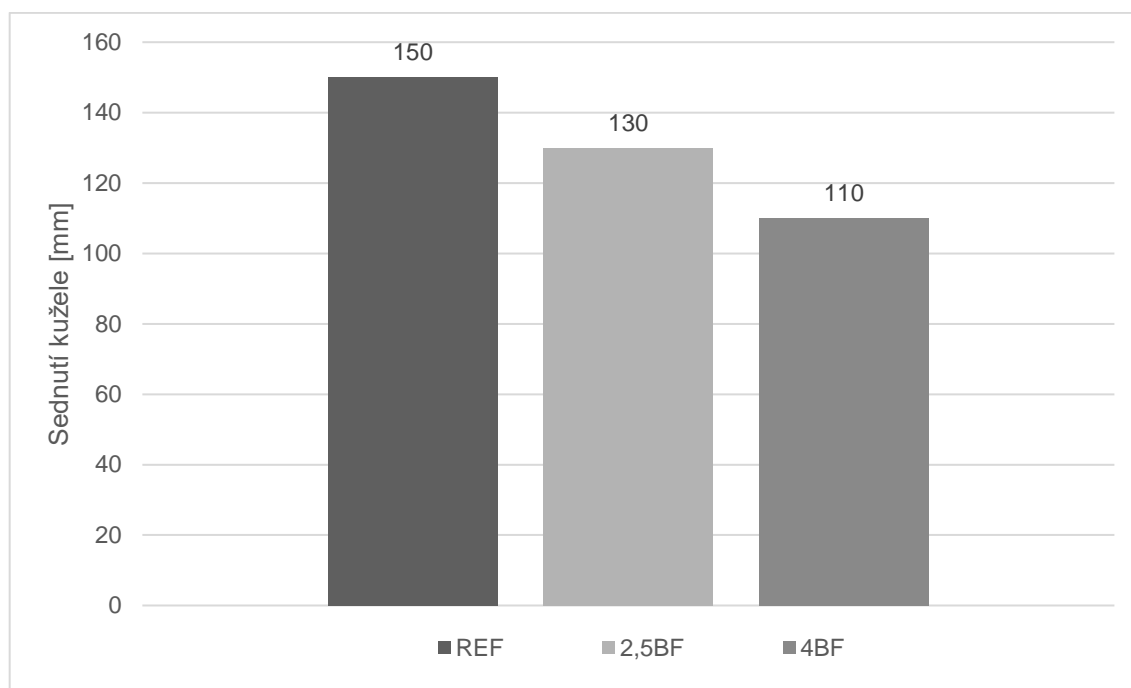
5.6 Výsledky provedených zkoušek

5.6.1 Vlastnosti v čerstvém stavu

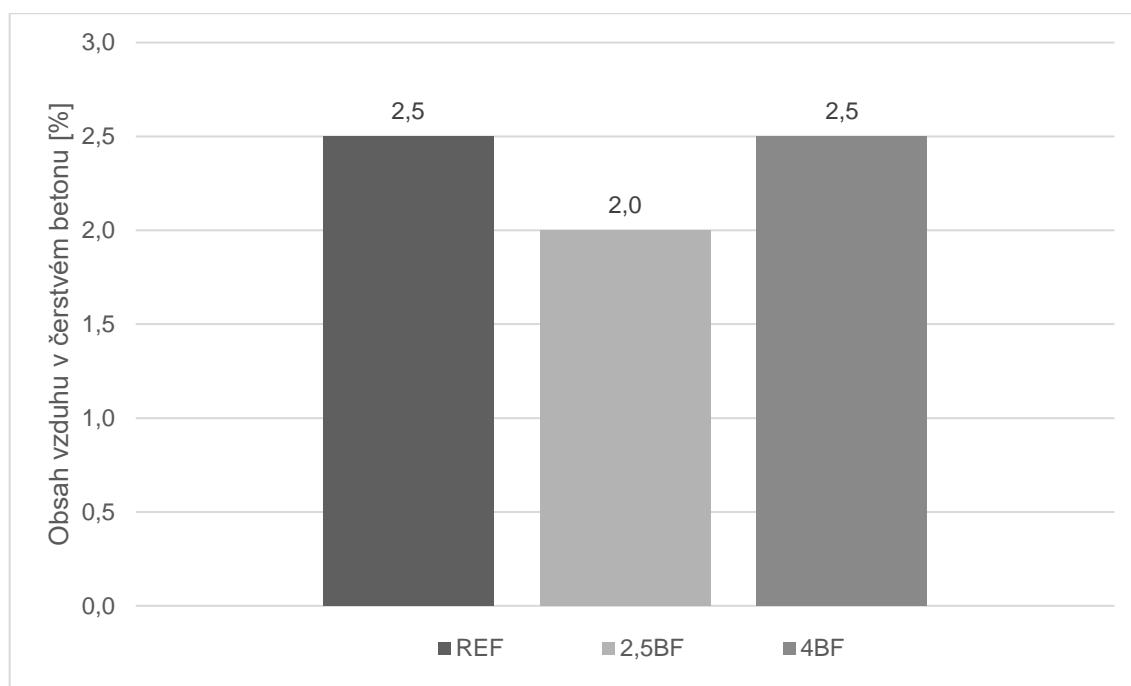
Tabulka 14 – Vlastnosti v čerstvém stavu

Označení směsi	Sednutí kužele [mm]	Obsah vzduchu v čerstvém betonu [%]	Objemová hmotnost D_{CB} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
REF	150	2,5	2 550
2,5BF	130	2,0	2 540
4BF	110	2,5	2 530

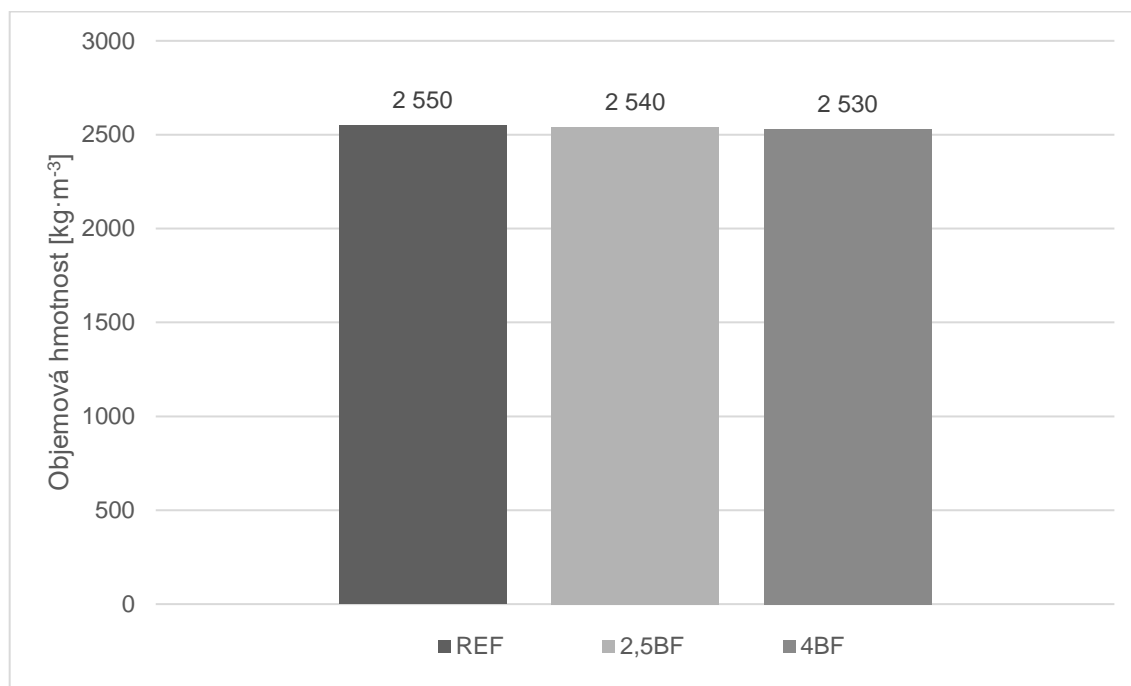
Graf 21 – Vliv množství vláken na sednutí kužele



Graf 22 – Vliv množství vláken na obsah vzduchu v čerstvém betonu



Graf 23 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost čerstvého betonu

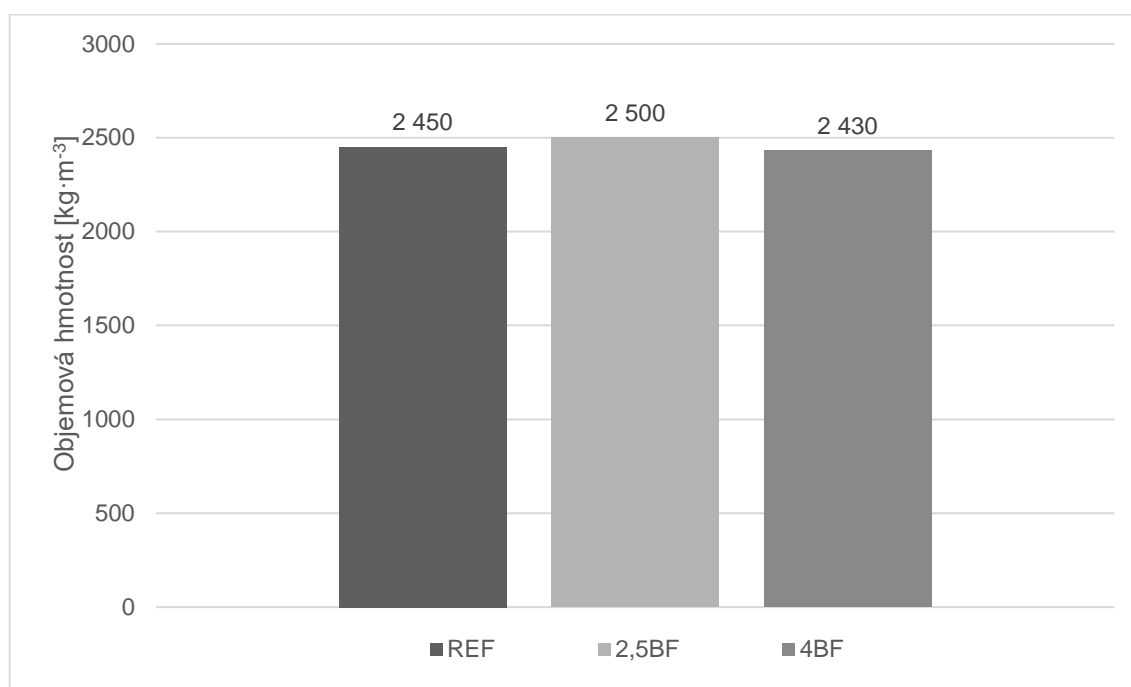


5.6.2 Vlastnosti ve ztvrdlém stavu

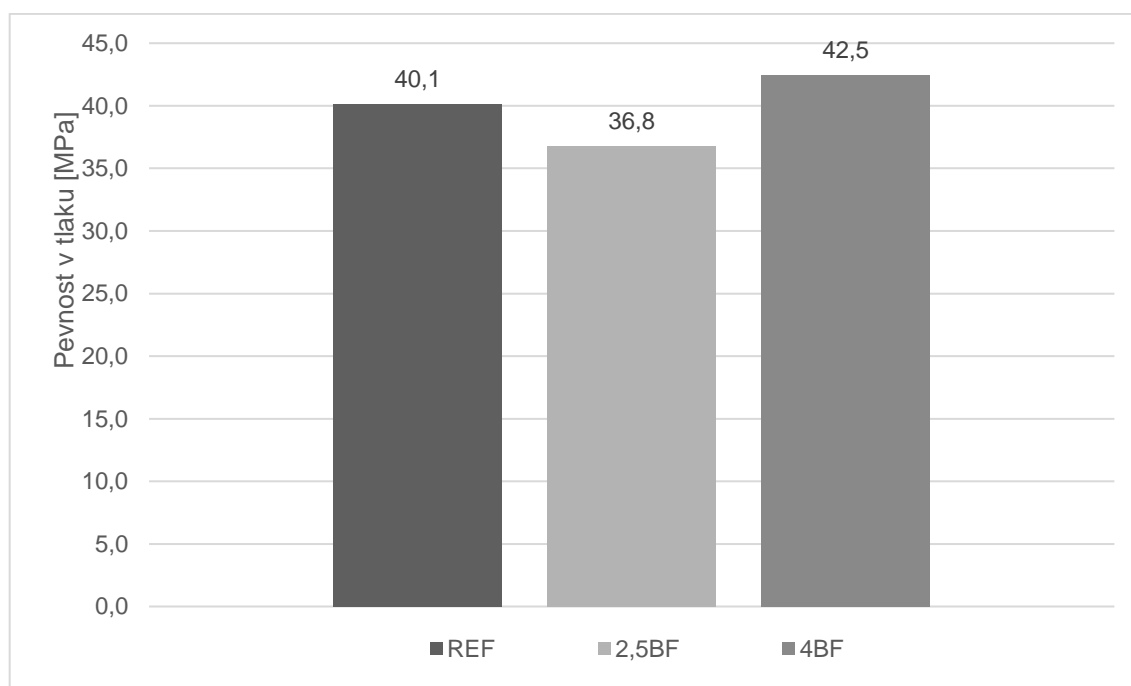
Tabulka 15 – Vlastnosti ve ztvrdlém stavu

Označení směsi	Objemová hmotnost D_{zB} [kg·m ⁻³]	Pevnost v tlaku f_c [MPa]	Pevnost v tahu ohybem f_{ct} [MPa]
REF	2 450	40,1	4,2
2,5BF	2 500	36,8	4,8
4BF	2 430	42,5	4,5

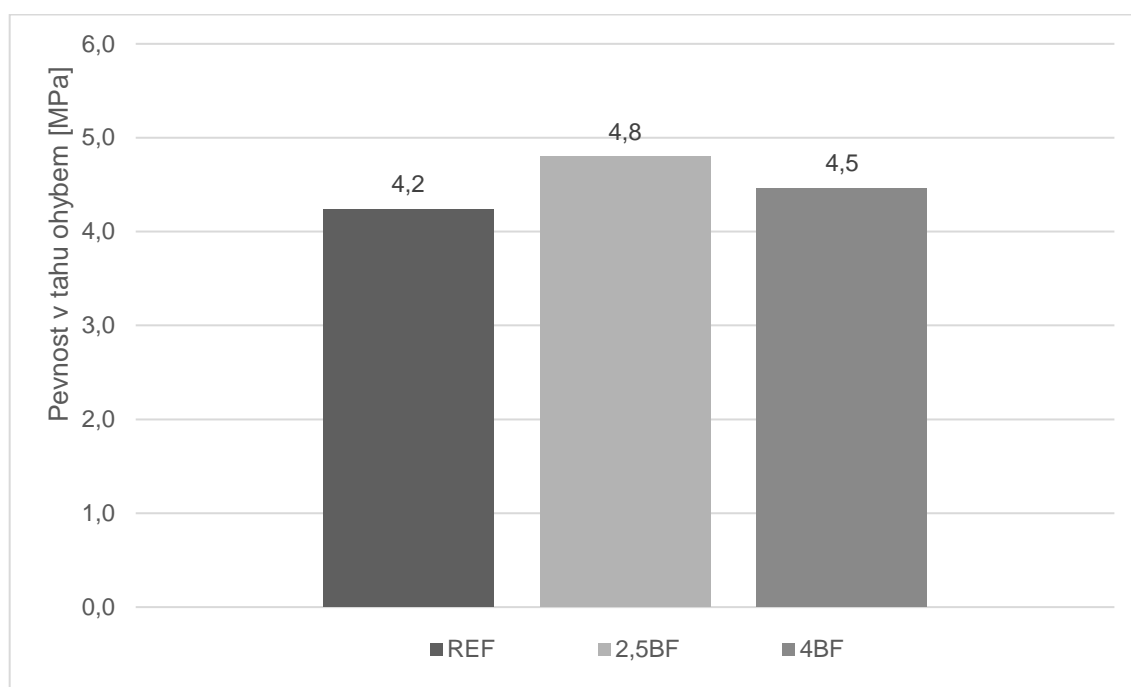
Graf 24 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu



Graf 25 – Vliv množství vláken na pevnost betonu v tlaku po 28 dnech



Graf 26 – Vliv množství vláken na pevnost betonu v tahu ohybem po 28 dnech

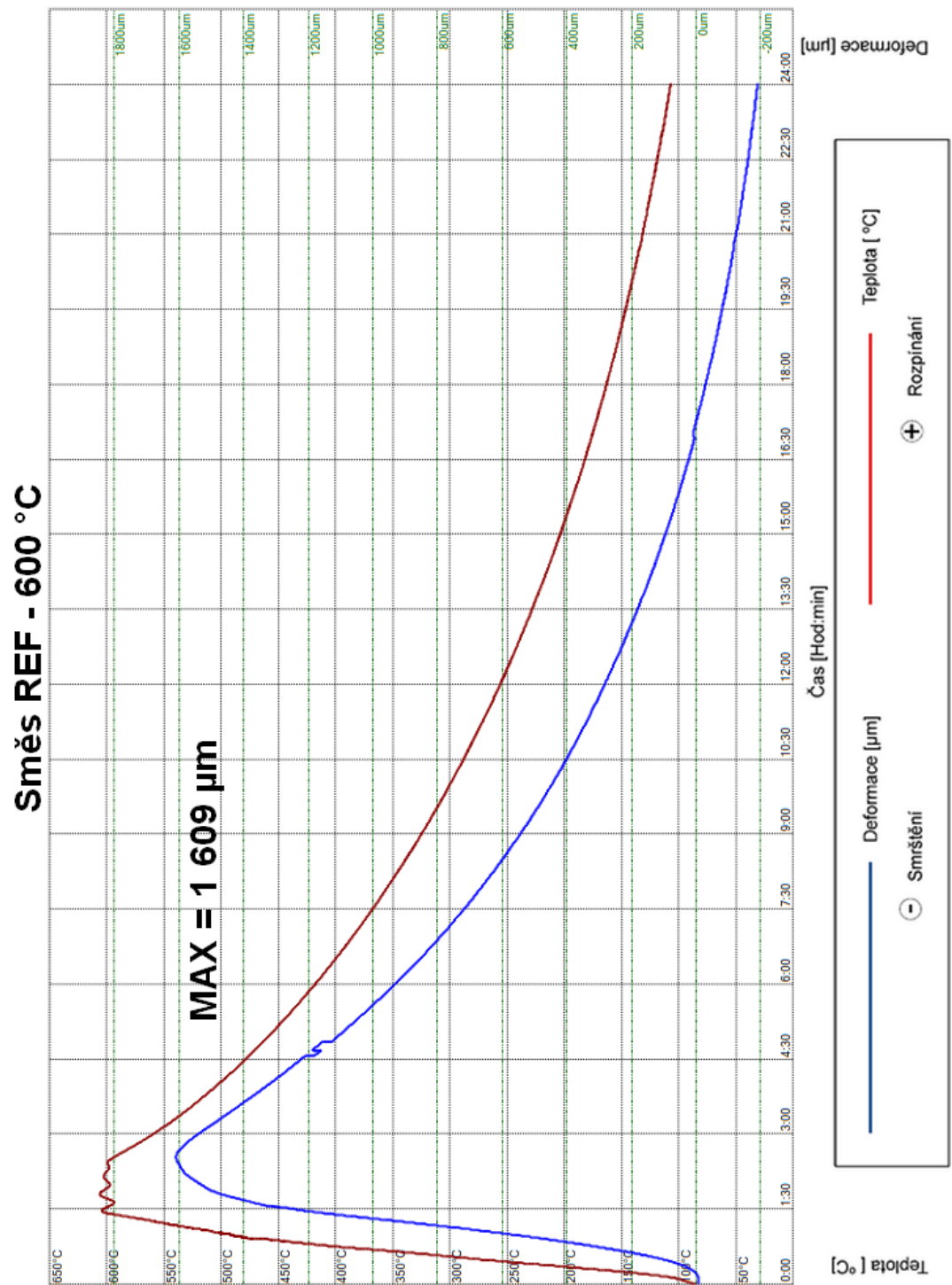


5.6.3 Zahřátí betonu na vysoké teploty

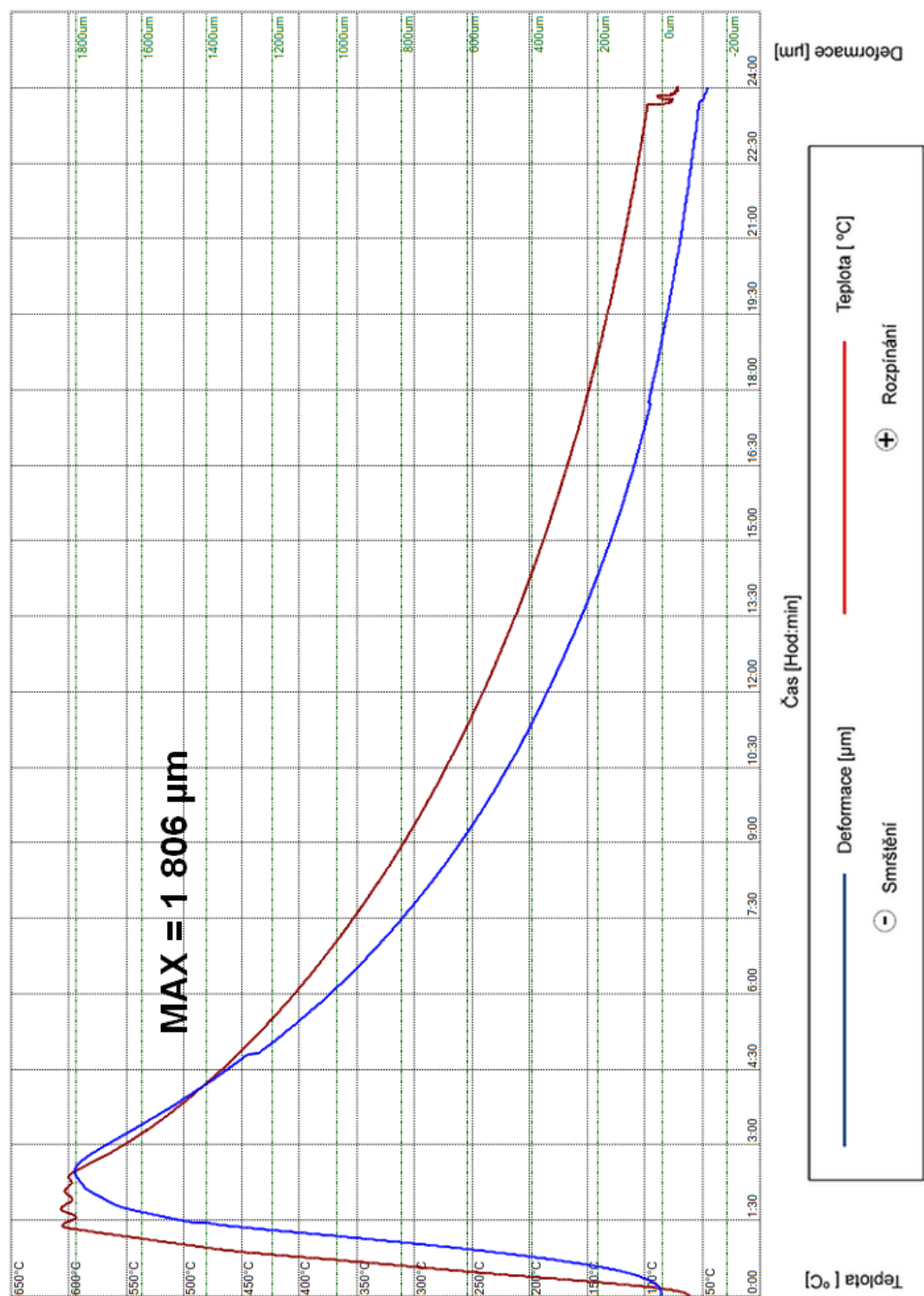
5.6.3.1 Záznam průběhu teploty a deformace při zahřívání

Na následujících grafech můžeme vidět záznam průběhu teploty a deformace při zahřívání a volném ochlazování. Na ose x je čas v hodinách, na levé ose y je teplota ve stupních Celsia a na pravé ose y je deformace vzorku v mikrometrech.

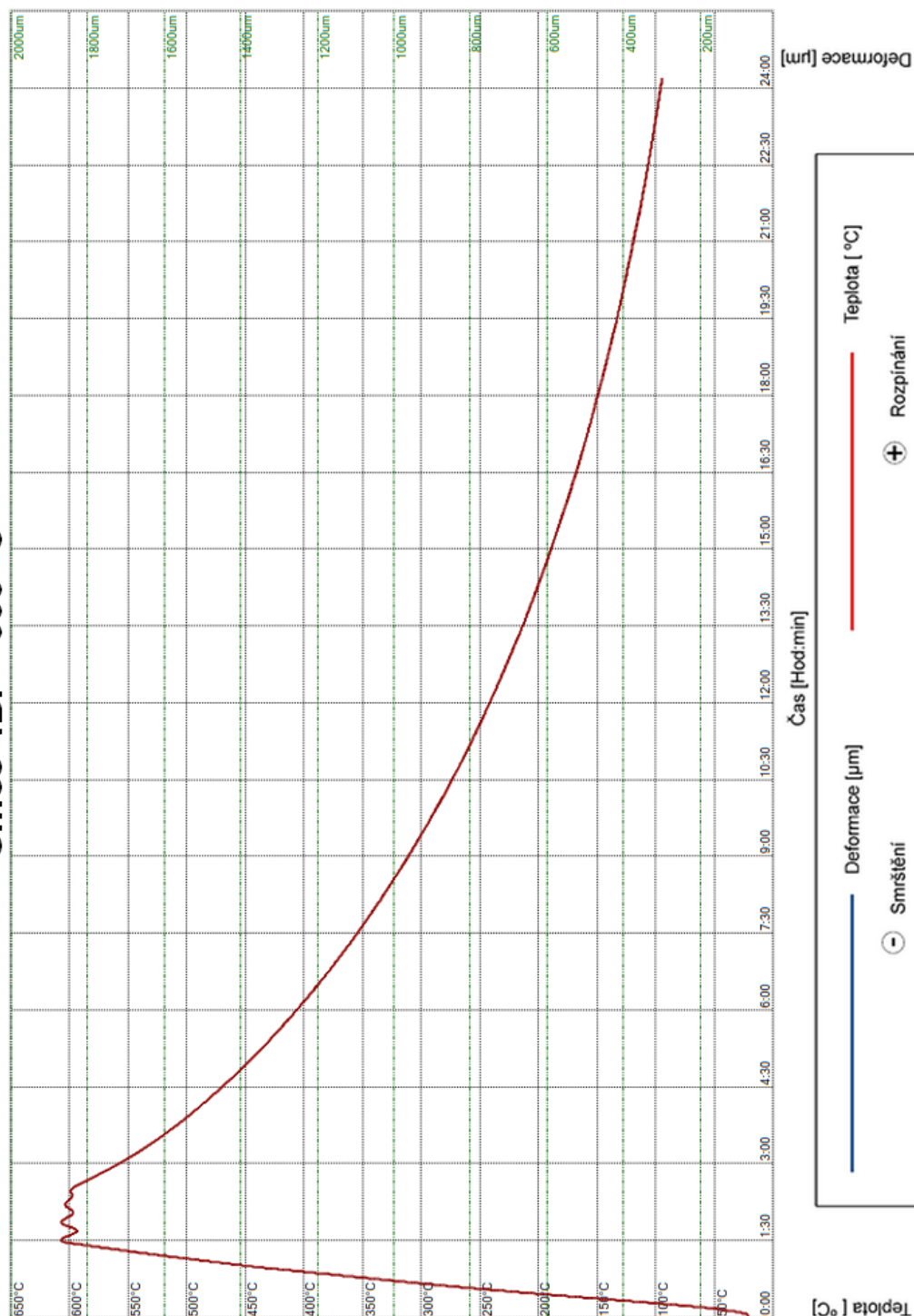
5.6.3.1.1 Vyhodnocení pro teplotu 600 °C



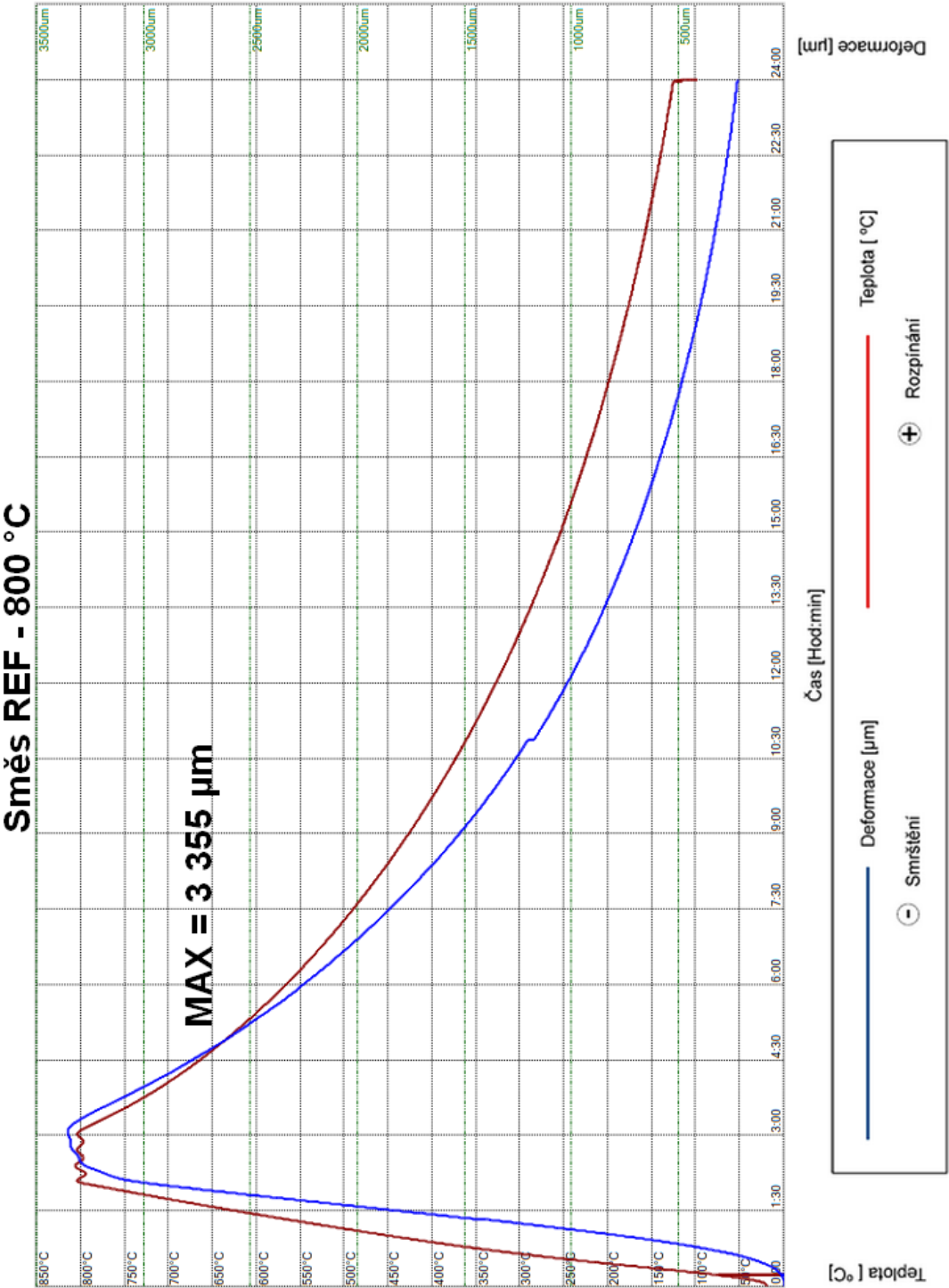
Směs 2,5BF - 600 °C



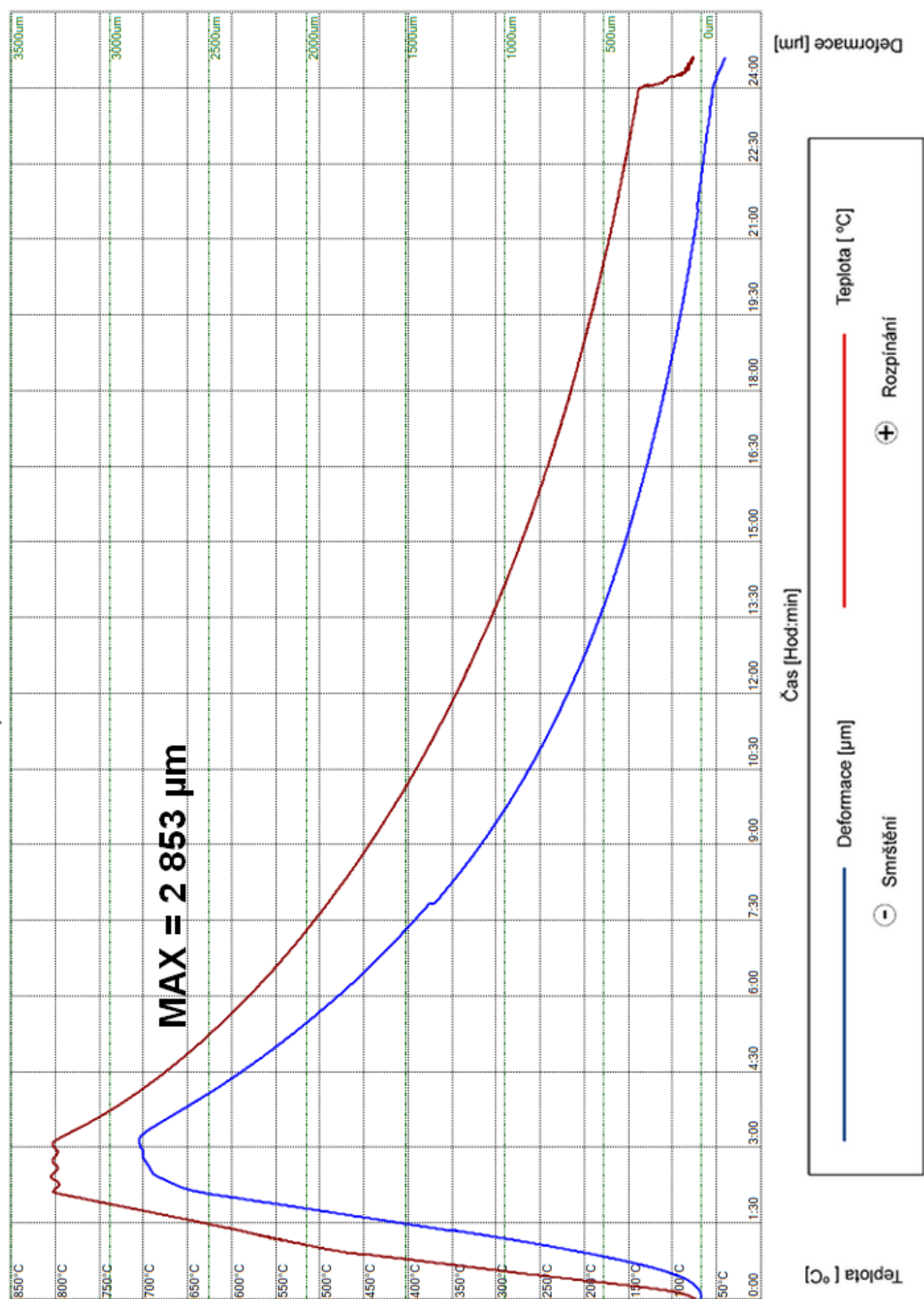
Směs 4BF - 600 °C



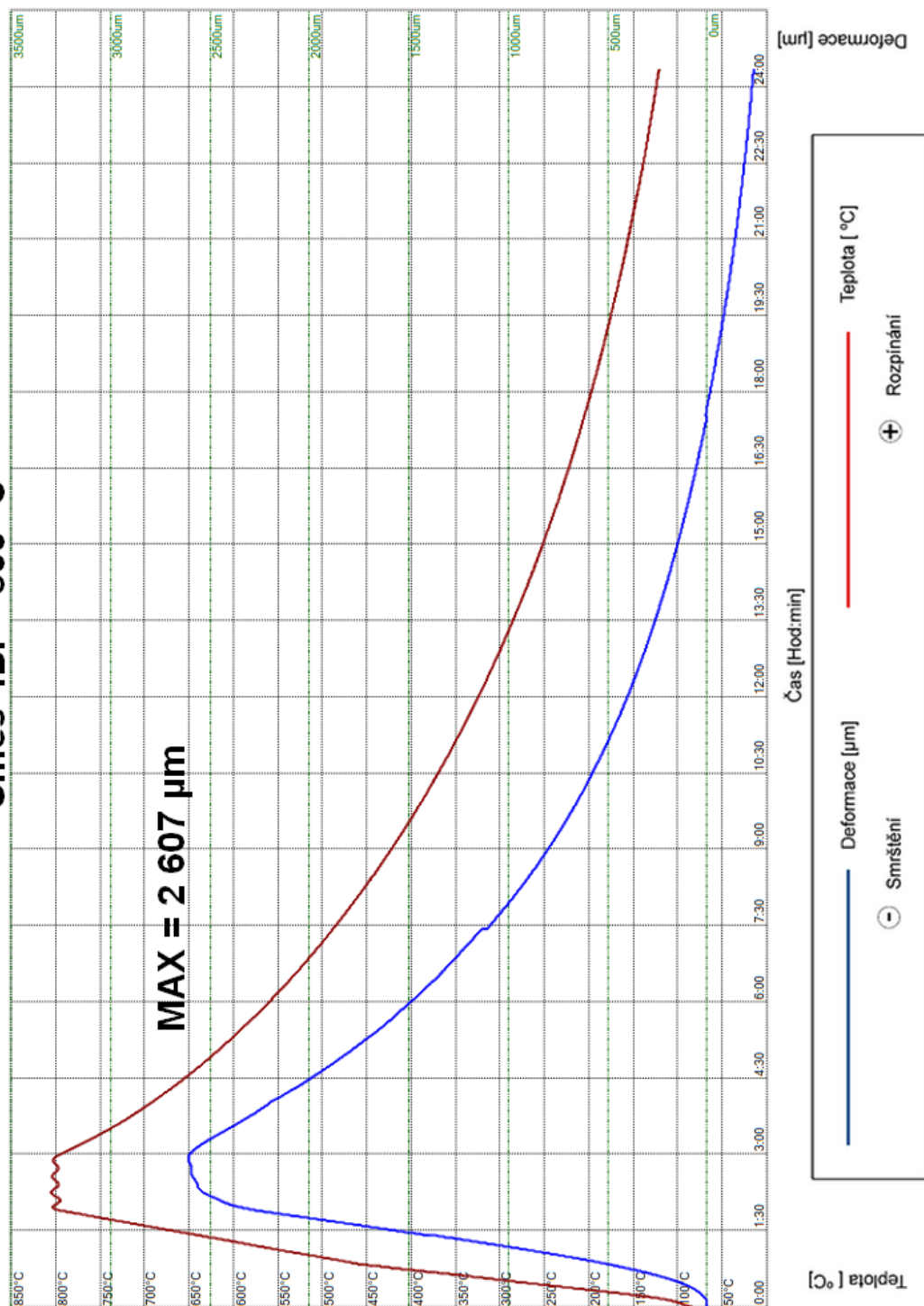
5.6.3.1.2 Vyhodnocení pro teplotu 800 °C



Směs 2,5BF - 800 °C



Směs 4BF - 800 °C

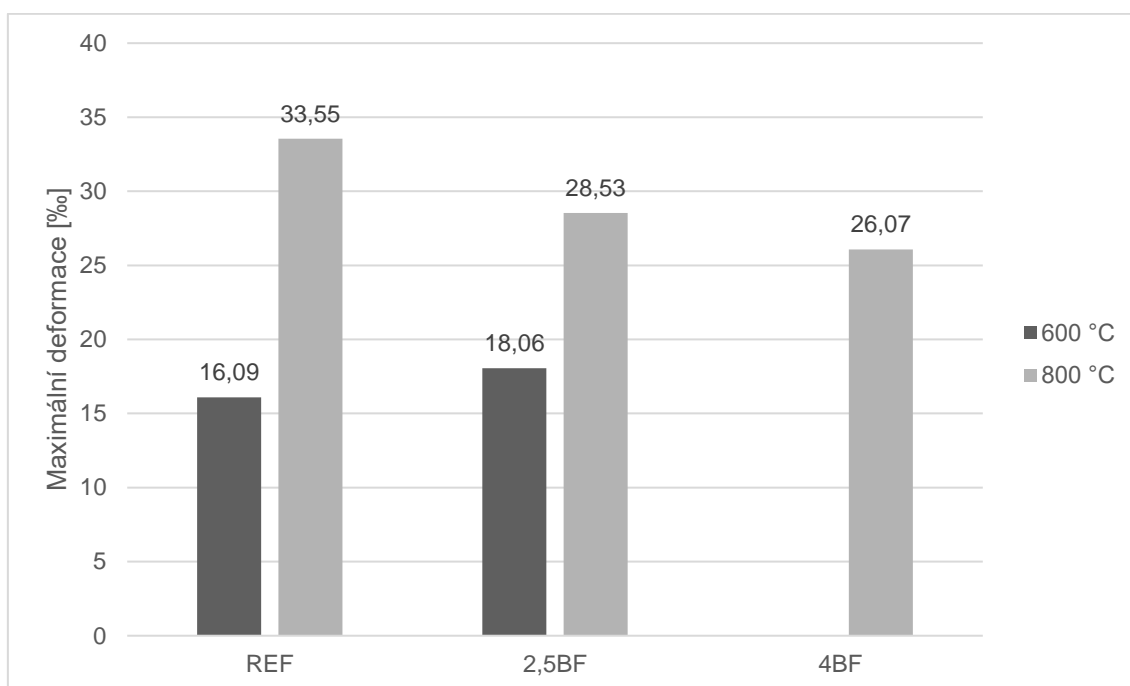


Tabulka 16 ukazuje maximální dosažené deformace odečtené z předchozích grafů.

Tabulka 16 – Souhrn deformací všech vzorků vystavených vysokým teplotám

Označení směsi	Teplota [°C]	Maximální deformace [μm]	Maximální deformace [‰]
REF	600	1 609	16,09
	800	3 355	33,55
2,5BF	600	1 806	18,06
	800	2 853	28,53
4BF	600	neměřeno	neměřeno
	800	2 607	26,07

Graf 27 – Závislost maximálních dosažených deformací na teplotě

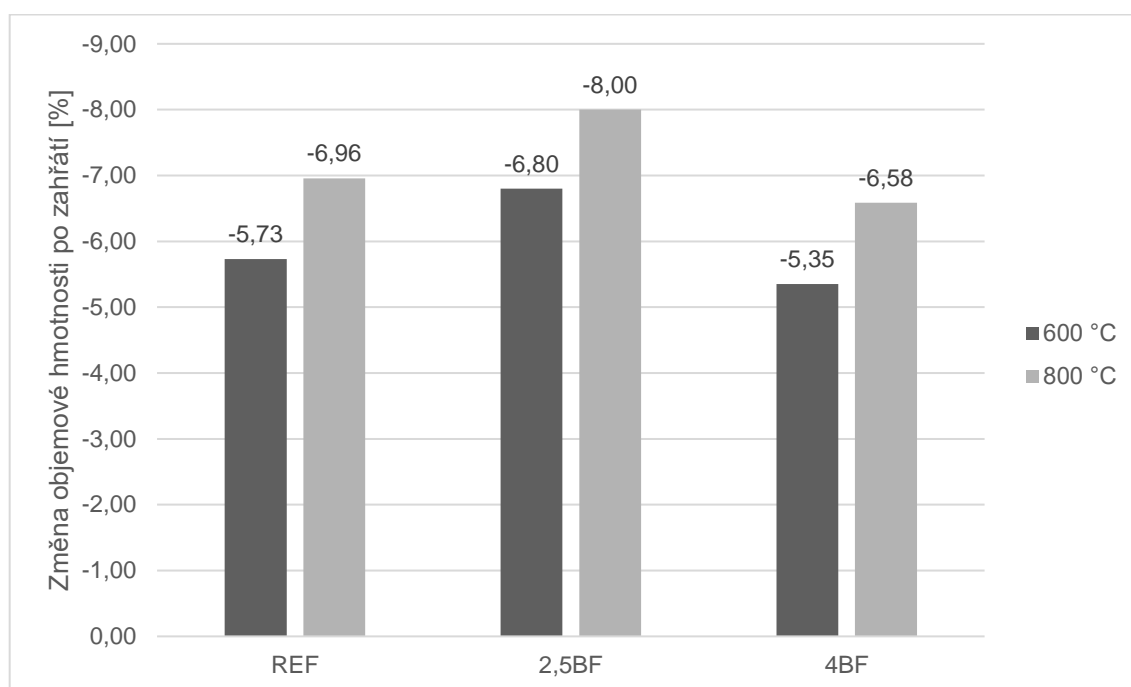


5.6.3.2 Změna objemové hmotnosti

Tabulka 17 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí

Označení směsi	Teplota [°C]	Před zahřátím	Po zahřátí	Změna objemové hmotnosti [%]
		D_{ZB} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	D_{ZB} [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	
REF	600	2 450	2 310	-5,73
	800		2 280	-6,96
2,5BF	600	2 500	2 330	-6,80
	800		2 300	-8,00
4BF	600	2 430	2 300	-5,35
	800		2 270	-6,58

Graf 28 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí

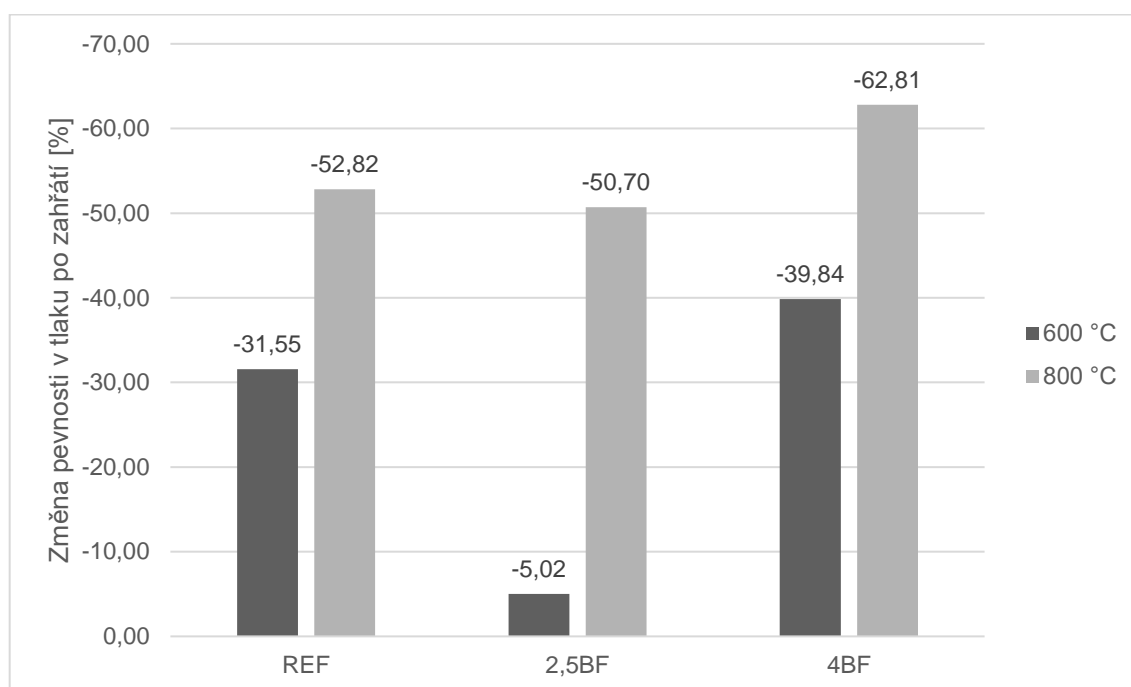


5.6.3.3 Změna pevnosti v tlaku

Tabulka 18 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí

Označení směsi	Teplota [°C]	Před zahřátím	Po zahřátí	Změna pevnosti v tlaku [%]
		f_c [MPa]	f_c [MPa]	
REF	600	40,1	27,5	-31,55
	800		18,9	-52,82
2,5BF	600	36,8	35,0	-5,02
	800		18,1	-50,70
4BF	600	42,5	25,6	-39,84
	800		15,8	-62,81

Graf 29 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí



5.6.3.4 Vizuální posouzení

5.6.3.4.1 Směs REF

Na vzorcích se po zahřátí na teploty 600 a 800 °C objevují zřetelné trhliny, které jsou viditelné po celém povrchu vzorku, jak je patrné z obrázků 22 a 23.



Obrázek 22 – Vzorek směsi REF po zahřátí na 600 °C



Obrázek 23 – Vzorek směsi REF po zahřátí na 800 °C

5.6.3.4.2 Směs 2,5BF

Vzorky zahřáté na teplotu 600 °C nevykazují žádné vizuální změny (obrázek 24). U vzorků zahřátých na teplotu 800 °C můžeme pozorovat vznik trhlin po celém povrchu vzorku (obrázek 25).



Obrázek 24 – Vzorek směsi 2,5BF po zahřátí na 600 °C



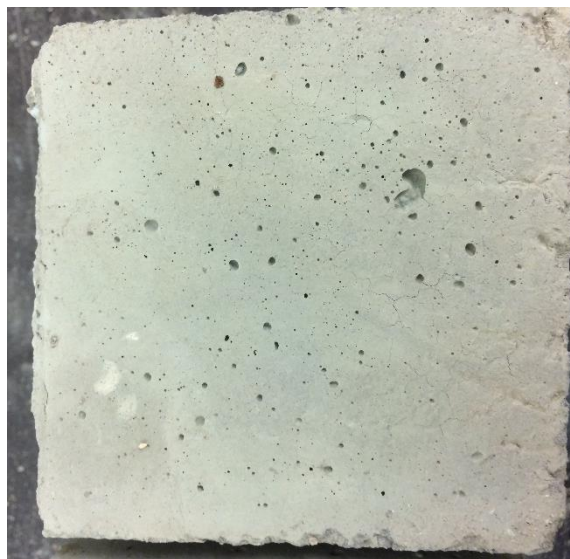
Obrázek 25 – Vzorek směsi 2,5BF po zahřátí na 800 °C

5.6.3.4.3 Směs 4BF

Na vzorcích zahřátých na 600 i 800 °C se objevují trhliny. Nejsou však po celém povrchu vzorku, ale jen místy jak je vidět na obrázcích 26 a 27.



Obrázek 26 – Vzorek směsi 4BF po zahřátí na 600 °C



Obrázek 27 – Vzorek směsi 4BF po zahřátí na 800 °C

5.7 Výsledky a diskuze

V etapě I experimentální části této diplomové práce byly namíchány celkem 2 směsi betonu s čedičovými vlákny v množství 2,5 (2,5BF) a 4 kg·m⁻³ (4BF) a 1 referenční směs bez vláken (REF). Ve všech recepturách bylo použito čedičové kamenivo frakcí 0-4, 4-8 a 8-16 mm.

V čerstvém stavu bylo cílem ověřit konzistenci a obsah vzduchu. Ve ztvrdlém stavu bylo úkolem se zaměřit na pevnost betonu v tahu ohybem a pevnost betonu v tlaku. Vzorky všech směsí byly zahřáty na teploty 600 a 800 °C a byla ověřena změna jejich objemové hmotnosti, změna pevnosti v tlaku a změna vzhledu. Během zahřívání byla pozorována deformace vzorků.

Čedičová vlákna se zvyšujícím se množstvím zhoršovala konzistenci betonu. Všechny směsi byly namíchány na stupeň konzistence S3 sednutím kužele. Ovšem zatímco směs REF měla sednutí kužele 150 mm, směs 2,5BF měla sednutí kužele 130 mm a směs 4BF pouze 110 mm. Můžeme tedy říct, že přidání čedičových vláken zhoršuje konzistenci betonu. Jemná vlákna mají vysoký měrný povrch. Důvodem zhoršení konzistence může tedy být spotřeba vody na smáčení tohoto povrchu. Čedičová vlákna neměla žádný vliv na obsah vzduchu v čerstvém betonu. Jeho hodnota se pohybovala okolo 2 %, což je obvyklá hodnota neprovzdušněného betonu.

Od čedičových vláken nebyl očekáván pozitivní vliv na pevnost betonu v tlaku. Naopak se zhoršující konzistencí se očekává snížení pevnosti betonu v tlaku. Vzorky směsi REF měly pevnost v tlaku po 28 dnech 40,1 MPa. Zatímco pevnost v tlaku betonu směsi 2,5BF oproti referenční mírně klesla na 36,8 MPa, pevnost betonu v tlaku směsi 4BF mírně vzrostla na 42,5 MPa. Čedičová vlákna tedy neměla žádný významný vliv na pevnost betonu v tlaku po 28 dnech.

Naopak byl očekáván vliv čedičových vláken na pevnost betonu v tahu ohybem. Vzorky směsi REF dosáhly pevnosti v tahu ohybem 4,2 MPa, což je běžná hodnota pro nevyztužený beton. Pevnost v tahu ohybem betonu s vlákna byla srovnatelná a to pro vzorky 2,5BF 4,8 MPa a pro vzorky 4BF 4,5 MPa. Ani na pevnost v tahu ohybem po 28 dnech tedy čedičová vlákna neměla významný vliv.

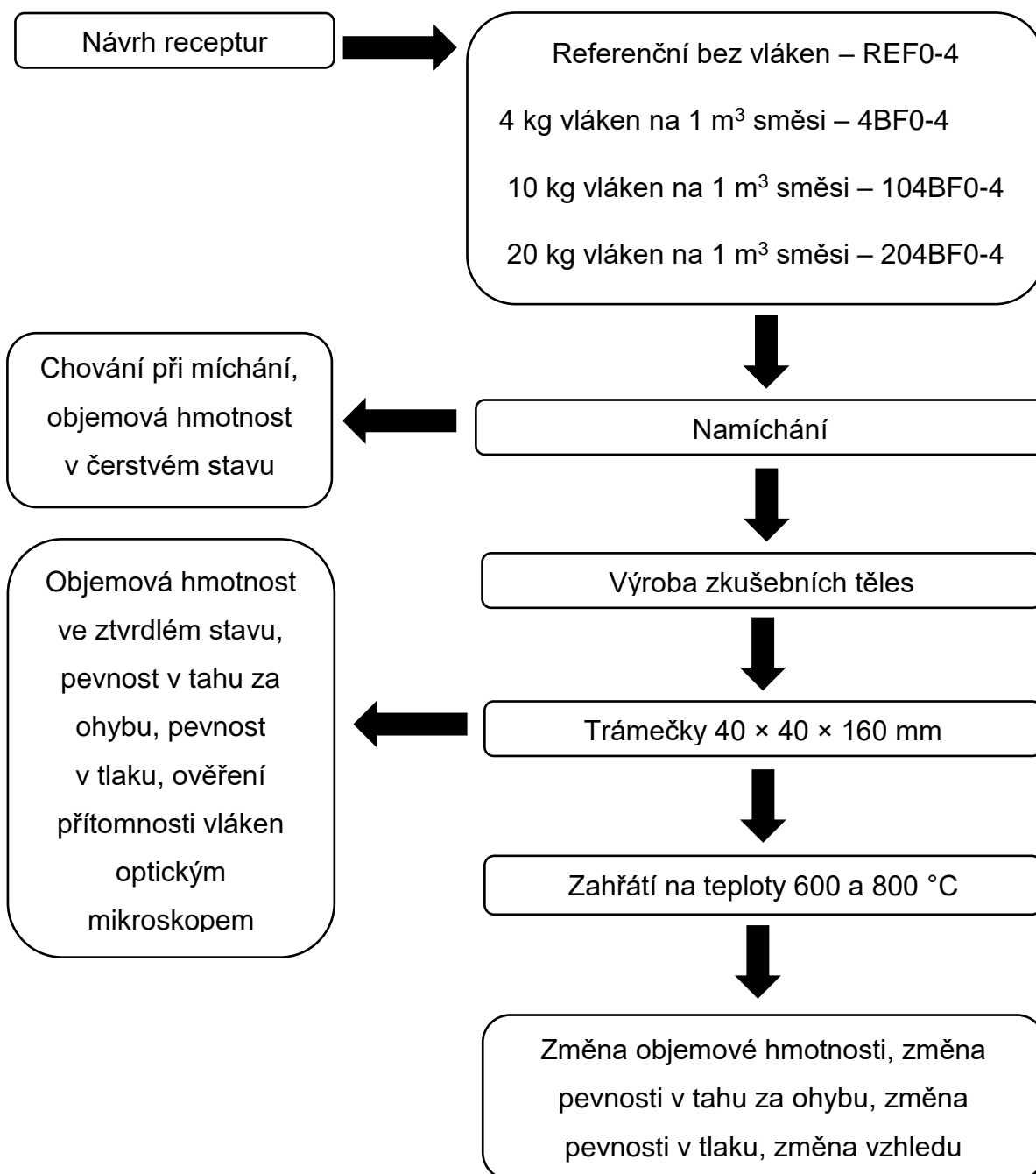
Vzorky všech tří receptur byly zatíženy teplotami 600 a 800 °C. Nejmenší pokles objemové hmotnosti po zahřátí vykazovaly vzorky směsi 4BF (5,35 % při 600 °C a

6,58 % při 800 °C). Tyto hodnoty jsou ovšem srovnatelné s těmi, které byly naměřeny u vzorků směsi REF (5,73 % při 600 °C a 6,96 % při 800 °C). Nevětší pokles byl zaznamenán u vzorků směsi 2,5BF (6,80 % při 600 °C a 8,00 % při 800 °C). Po zahřátí na 800 °C výrazně klesala pevnost v tlaku všech vzorků. U vzorků směsi REF o 52,82 %, u vzorků směsi 2,5BF o 50,70 % a u vzorků směsi 4BF o 62,81 %. Po zahřátí na 600 °C byl pokles tlakové pevnosti poměrně vysoký u vzorků směsi REF (31,55 %) a u směsi 4BF (39,84 %). Nicméně pevnost vzorků směsi 2,5BF po zahřátí na 600 °C klesla pouze o 5,02 %. Je tedy patrné, že čedičová vlákna nemají vliv na pokles pevnosti v tlaku betonu po zahřátí na 800 °C, ale můžeme pozorovat pozitivní vliv na pokles tlakové pevnosti u vzorků betonu s 2,5 kg čedičových vláken, které byly zatíženy teplotou 600 °C. To koresponduje i s vizuálním posouzením vzorků. Na povrchu všech vzorků zahřátých na teplotu 800 °C se objevovali trhliny. Podobně tomu bylo i u vzorků směsi REF a směsi 4BF zahřátých na teplotu 600 °C. Ovšem na vzorcích směsi 2,5BF zahřátých na 600 °C nebyly žádné trhliny patrné. Proto ani pokles pevnosti v tlaku nebyl tak významný.

Při zahřívání vzorků a jejich volném chlazení byl pozorován průběh deformací v čase. Po měření byla vyhodnocena hodnota maximálního rozpínání. Při teplotě 600 °C byla maximální deformace vzorku směsi REF 16,09 ‰ a vzorků směsi 2,5BF 18,06 ‰. U vzorku směsi 4BF nebyla bohužel z technických důvodů deformace změřena. Při zahřátí na teplotu 800 °C maximální deformace klesala se vzrůstajícím množstvím vláken. Nejmenší byla u vzorku směsi 4BF (26,07 ‰) a největší u vzorku směsi REF (33,55 ‰). Vzorek směsi 2,5BF dosáhl maximální deformace 28,53 ‰.

6 Etapa II

6.1 Schéma prováděných zkoušek



6.2 Charakterizace vstupních surovin

6.2.1 Cement

- Portlandský cement CEM I 42,5 od společnosti Českomoravský cement, a.s. ze závodu Mokrý.
- Stejný cement jako v etapě I.

6.2.2 Kamenivo

- Drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm z pískovny Žabčice společnosti Zepiko, s.r.o.



Obrázek 28 – Drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm

6.2.3 Plastifikátor

- Plastifikátor MAPEFLUID FM NA na bázi naftalensulfonátů od výrobce MAPEI Austria GmbH.

6.2.4 Vlákna

- Čedičová vlákna o průměru 17 μm a délce 24,4 mm od společnosti Basaltex.
- Stejná vlákna jako v etapě I.

6.3 Receptury

6.3.1 Směs REF0-4

Referenční směs bez vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného těženého kameniva frakce 0-4 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 19 – Složení směsi REF0-4

Složky směsi	Množství [kg·m ⁻³]
CEM I 42,5	340
Drobné těžené kamenivo 0-4 mm	1 988
Voda	153
Plastifikátor MAPEFLUID FM NA	5,1

6.3.2 Směs 4BF0-4

Směs se 4 kg čedičových vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného těženého kameniva frakce 0-4 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 20 – Složení směsi 4BF0-4

Složky směsi	Množství [kg·m ⁻³]
CEM I 42,5	340
Drobné těžené kamenivo 0-4 mm	1 988
Voda	153
Plastifikátor MAPEFLUID FM NA	5,1
Čedičová vlákna Basaltex BCS17-25.4-KV13	4

6.3.3 Směs 10BF0-4

Směs s 10 kg čedičových vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného těženého kameniva frakce 0-4 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 21 – Složení směsi 10BF0-4

Složky směsi	Množství [kg·m ⁻³]
CEM I 42,5	340
Drobné těžené kamenivo 0-4 mm	1 988
Voda	153
Plastifikátor MAPEFLUID FM NA	5,1
Čedičová vlákna Basaltex BCS17-25.4-KV13	10

6.3.4 Směs 20BF0-4

Směs s 20 kg čedičových vláken byla složena z cementu CEM I 42,5, drobného těženého kameniva frakce 0-4 mm, vody a plastifikátoru.

Tabulka 22 – Složení směsi 20BF0-4

Složky směsi	Množství [kg·m ⁻³]
CEM I 42,5	340
Drobné těžené kamenivo 0-4 mm	1 988
Voda	153
Plastifikátor MAPEFLUID FM NA	5,1
Čedičová vlákna Basaltex BCS17-25.4-KV13	20

6.4 Příprava a ošetřování zkušebních vzorků

Jemnozrnný cementový kompozit s těžným kamenivem frakce 0-4 mm byl namíchán ručně, aby mohlo být pozorováno chování vláken při míchání, zejména jejich schopnost rozdispergovat se v celém objemu čerstvého betonu. Z každé směsi bylo potom připraveno 6 trámečků 40 × 40 × 160 mm. Trojformy s trámečky byly zhuťnuty na vibračním stole. Vzorky byly poté na 28 dní uloženy do vlhkého prostředí. Před zahřátím byly vzorky uloženy na 24 hodin v sušárně při teplotě 100 °C. Vzorky byly vysušeny z důvodu omezení možného explozivního odprýskávání a k omezení poškození žáruvzdorné vyzdívky pece vlhkostí.

6.5 Popis prováděných zkoušek a měření

6.5.1 Chování při míchání

V etapě II byly směsi jemnozrnného cementové kompozitu s vlákny míchány ručně v plastové misce. Důvodem byla lepší možnost sledování chování směsi při míchání. Sledována byla zejména schopnost vláken se rozdispergovat v celém objemu čerstvé směsi a změna její konzistence. Byla provedena fotodokumentace průběhu míchání.

6.5.2 Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Podstatou zkoušky objemové hmotnosti v čerstvém stavu je stanovení objemu nádoby, zvážení prázdné nádoby a zvážení nádoby po naplnění materiálem. Objemová hmotnost je stanovena podle vztahu:

$$D_{\check{C}B} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

kde:

$D_{\check{C}B}$ je objemová hmotnost čerstvého betonu [kg·m⁻³],

m_1 je hmotnost prázdné nádoby [kg],

m_2 hmotnost plné nádoby [kg],

V objem nádoby [m^3].

Výsledek objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

6.5.3 Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu byla stanovena na trámečcích $40 \times 40 \times 160$ mm po 28 dnech. Podstatou zkoušky je změření objemu a zvážením zkušebního tělesa.

$$D_{ZB} = \frac{m}{V}$$

kde:

D_{ZB} je objemová hmotnost ztvrdlého betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

m je hmotnost zkušebního tělesa [kg],

V objem zkušebního tělesa [m^3].

Výsledek objemové hmotnosti se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

6.5.4 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla zjišťována podle normy ČSN EN 196-1 – „Metody zkoušení cementu – Část 1: stanovení pevnosti“. Zkouška byla prováděna tříbodovým ohybem na trámečcích $40 \times 40 \times 160$ mm po 28 dnech. Podstatou je zatěžování trámečku jednou horní podporou a dvěma spodními podporami, které jsou od sebe vzdálené 100 mm. Zatěžování se provádí kolmo na směr ukládání betonu. Síla při porušení se zaznamená a pevnost v tahu ohybem se vypočte podle vztahu:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

kde:

f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa],

F síla při porušení vzorku [N],

L vzdálenost podpor 100 mm,

d_1 a d_2 rozměry příčného řezu tělesa [mm].

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.

6.5.5 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena podle normy ČSN EN 196-1 – „Metody zkoušení cementu – Část 1: stanovení pevnosti“. Zkouška byla prováděna na zlomcích trámečků po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, kolmo na směr hutnění, po 28 dnech. Podstatou je zatěžování ve zkušebním zařízení pro stanovení pevnosti v tlaku. Zatěžování se provádí kolmo na směr ukládání betonu. Síla při porušení se zaznamená a pevnost v tlaku se vypočte dle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A}$$

kde:

f_c je pevnost v tlaku [MPa],

F síla při porušení vzorku [N],

A tlačná plocha zkušebního zařízení 1600 mm².

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa.

6.5.6 Ověření přítomnosti vláken optickým mikroskopem

Přítomnost čedičových vláken byla ověřena optickým mikroskopem Leica DM4000 M LE ve výzkumném centru AdMaS. Byla pozorován jak samotná přítomnost vláken, tak tvorba shluků vláken.



Obrázek 29 – Optický mikroskop Leica DM4000 M LED [39]

6.5.7 Zahřátí betonu na vysoké teploty

Vzorky všech směsí byly zahřáty na teploty 600 a 800 °C. K zahřátí byla použita pec od společnosti Clasic, s.r.o., s měřícím zařízením a počítačovým programem pro záznam průběhu teploty. Jako vzorky byly použity trámečky 40 × 40 × 160 mm. Po zahřátí byla vyhodnocena změna objemové hmotnost, změna pevnost v tahu za ohybu a změna pevnosti v tlaku. Vzorky byly vizuálně posouzeny.

6.6 Výsledky provedených zkoušek

6.6.1 Chování při míchání

V této části diplomové práce byla zkoumána schopnost čedičových vláken rozmíchat se a rozdispergovat v celém objemu čerstvé směsi. Při menší dávce 4 kg·m⁻³ nejsou vlákna v čerstvé směsi dobře viditelná. Můžeme tedy odhadnout, že jsou dobře rozmíchána. Při vyšších dávkách 10 a 20 kg·m⁻³ se je rozmíchání vláken obtížnější a vlákna se drží při sobě v jednotlivých svazcích (obrázek 33). Se zvyšujícím množstvím vláken je tento problém patrnější a vlákna jdou obtížněji rozmíchat. To ukazují následující obrázky.



Obrázek 30 – Nerozmíchaná vlákna s čerstvé směsí 20BF0-4



Obrázek 31 – Rozmíchaná vlákna v čerstvé směsí 20BF0-4



Obrázek 32 – Detail rozmíchaných vláken v čerstvé směsi 4BF0-4



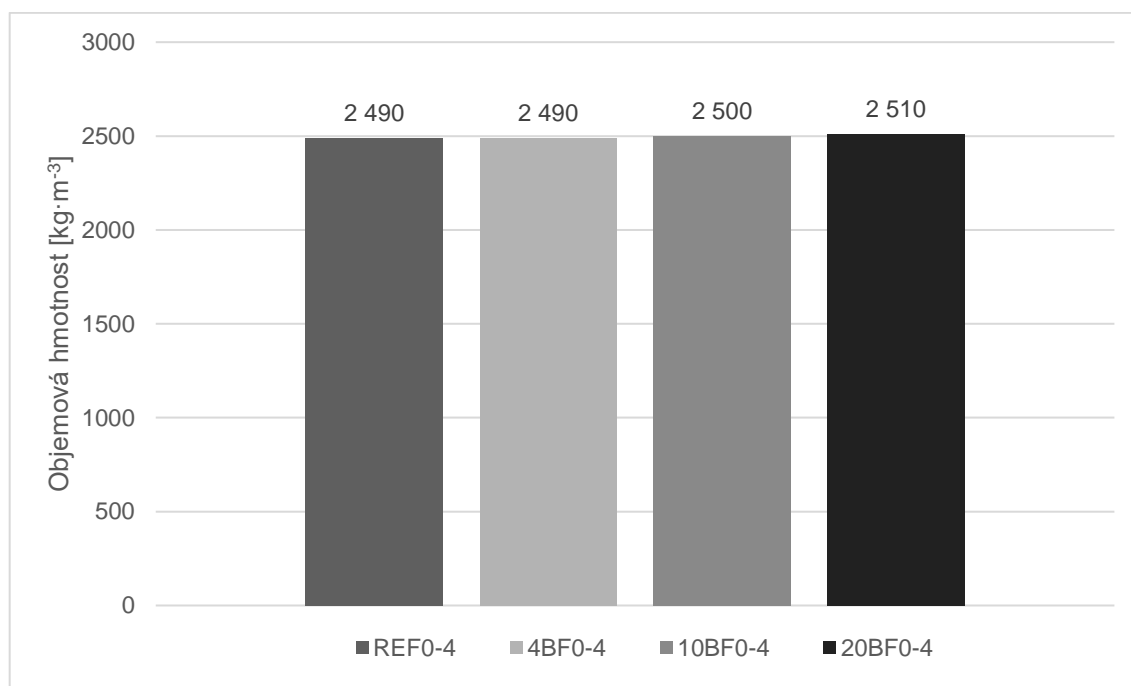
Obrázek 33 – Detail rozmíchaných vláken v čerstvé směsi 20BF0-4

6.6.2 Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Tabulka 23 – Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Označení směsi	Objemová hmotnost D_{CB} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
REF0-4	2 490
4BF0-4	2 490
10BF0-4	2 500
20BF0-4	2 510

Graf 30 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost čerstvého betonu

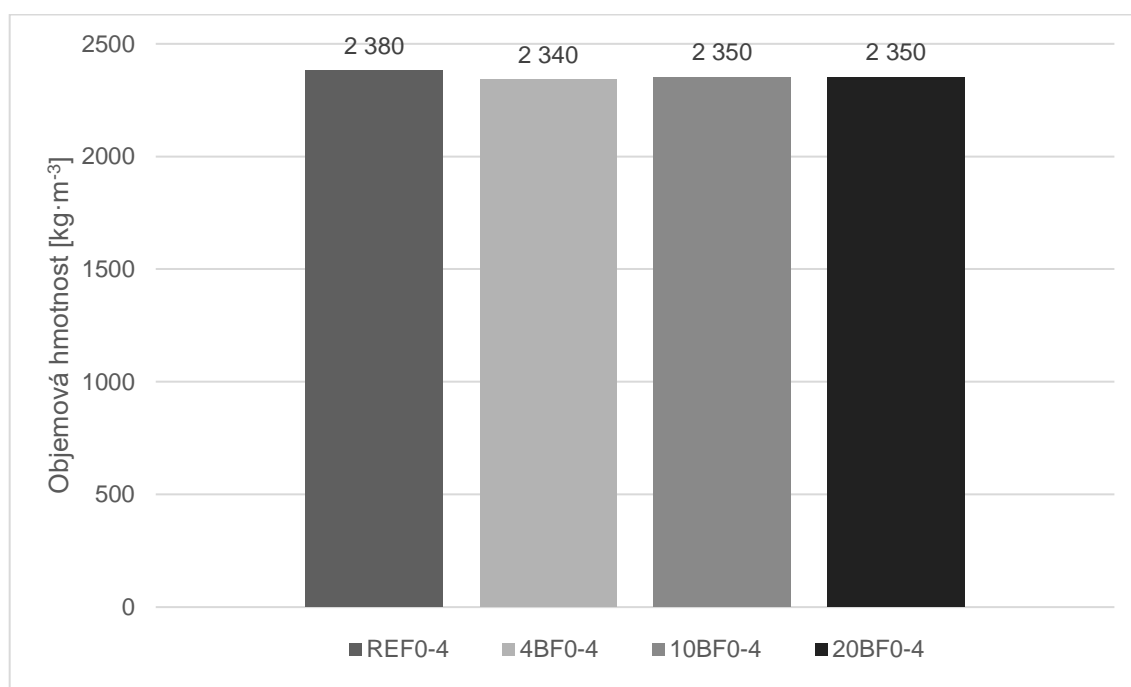


6.6.3 Vlastnosti ve ztvrdlém stavu

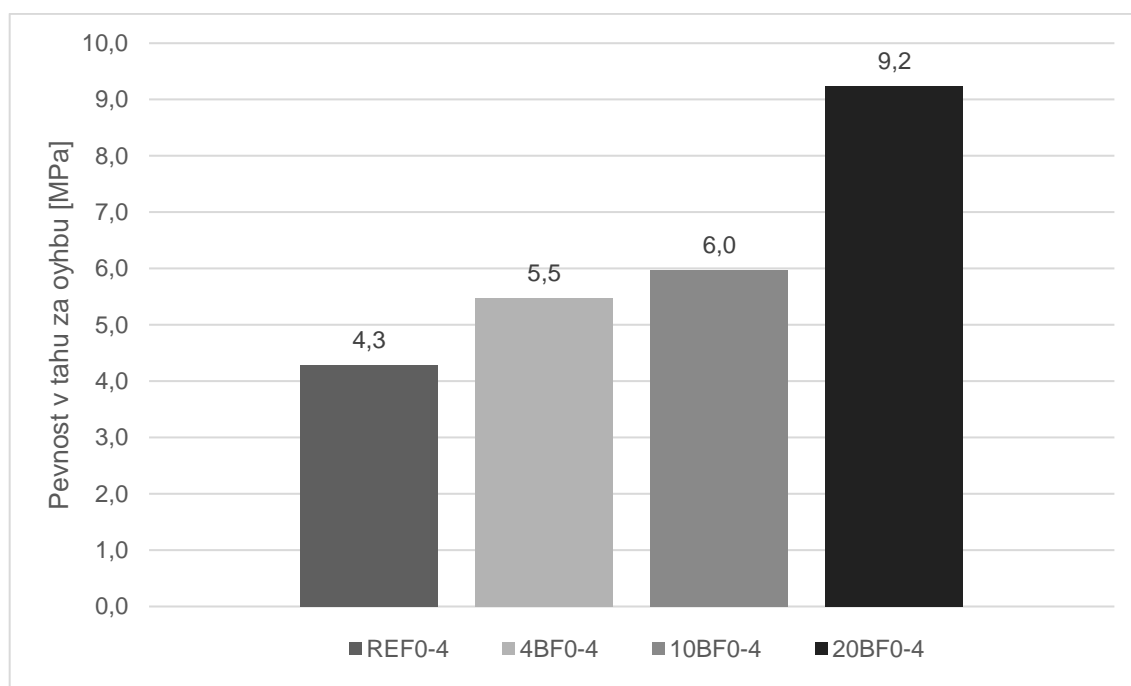
Tabulka 24 – Vlastnosti ve ztvrdlém stavu

Označení směsi	Objemová hmotnost D_z [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v tahu za ohybu f_{ct} [MPa]	Pevnost v tlaku f_c [MPa]
REF0-4	2 380	4,3	20,6
4BF0-4	2 340	5,5	20,9
10BF0-4	2 350	6,0	23,0
20BF0-4	2 350	9,2	22,5

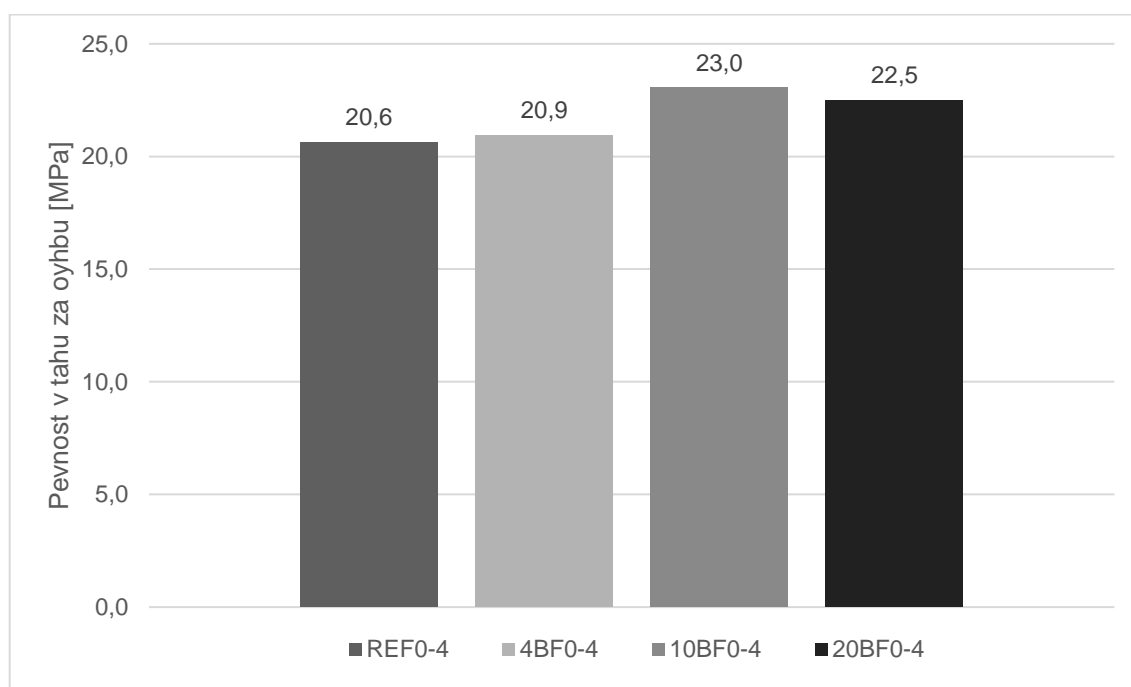
Graf 31 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost ve ztvrdlém stavu



Graf 32 – Vliv množství vláken na pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech



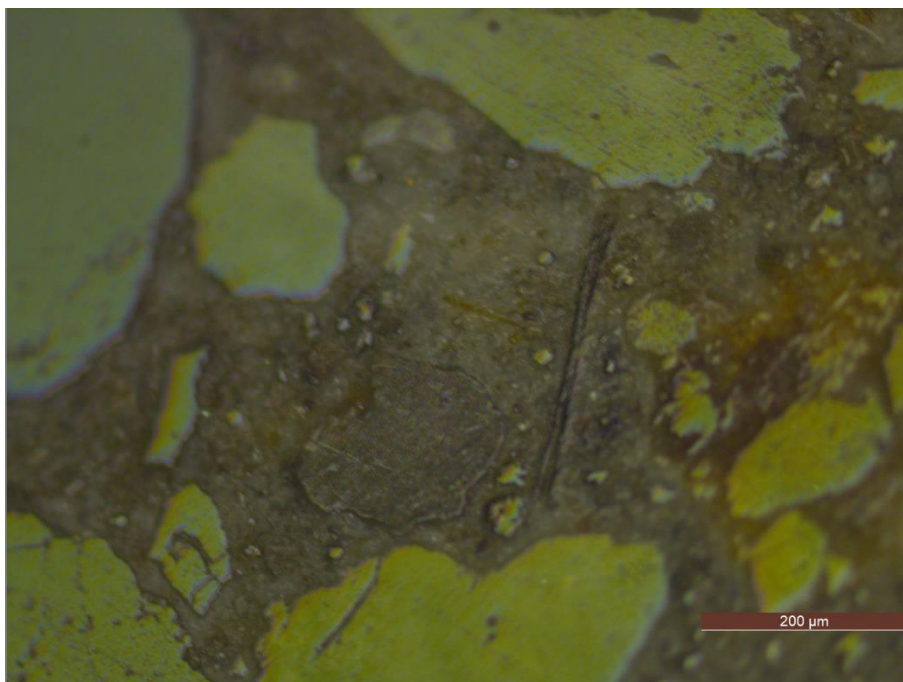
Graf 33 – Vliv množství vláken na pevnost v tlaku po 28 dnech



6.6.4 Ověření přítomnosti vláken optickým mikroskopem

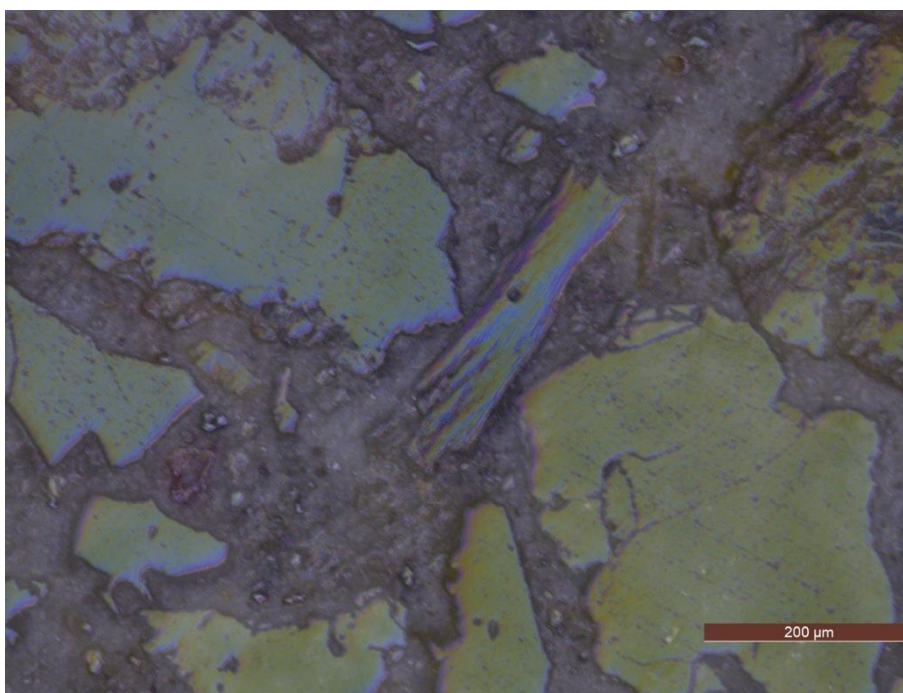
Ve vzorku směsi 20BF0-4 byla sledována přítomnost čedičových vláken optickým mikroskopem. Vzorky byly nařezány pilou s diamantovým kotoučem na destičky o ploše přibližně 10 × 10 mm a přibližně 5 mm silné. Jejich plocha byla naleštěna pro lepší viditelnost pod mikroskopem.

Na obrázku 34 lze vidět část čedičového vlákna v podélném směru.



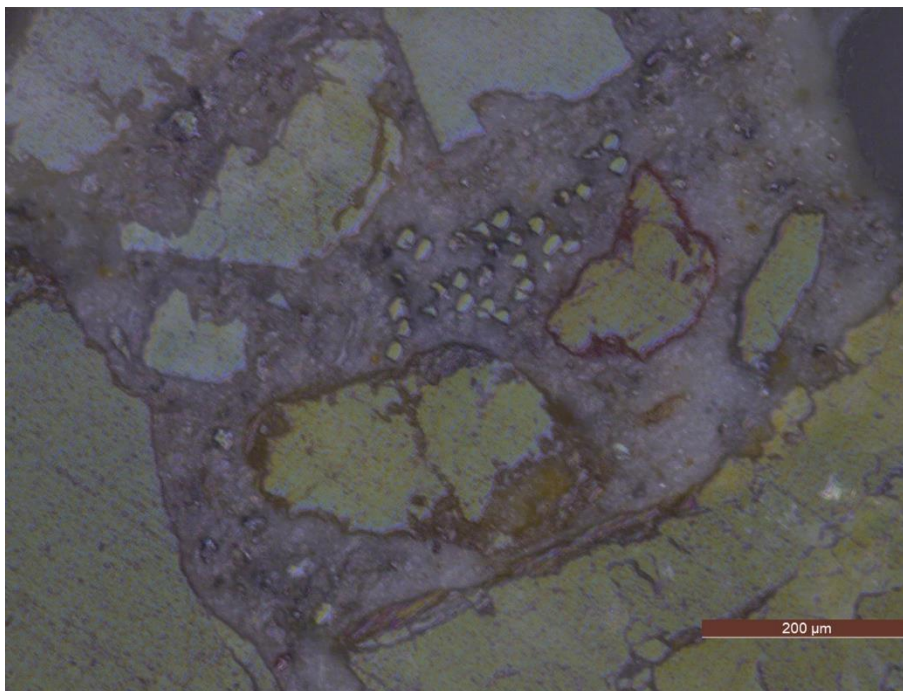
Obrázek 34 – Snímek z optického mikroskopu – čedičové vlákno v cementovém kompozitu

Na obrázku 35 můžeme vidět shluk vláken mezi zrna kameniva. Tento snímek potvrzuje předpoklad, že ne všechna vlákna byla dokonale rozmíchána.

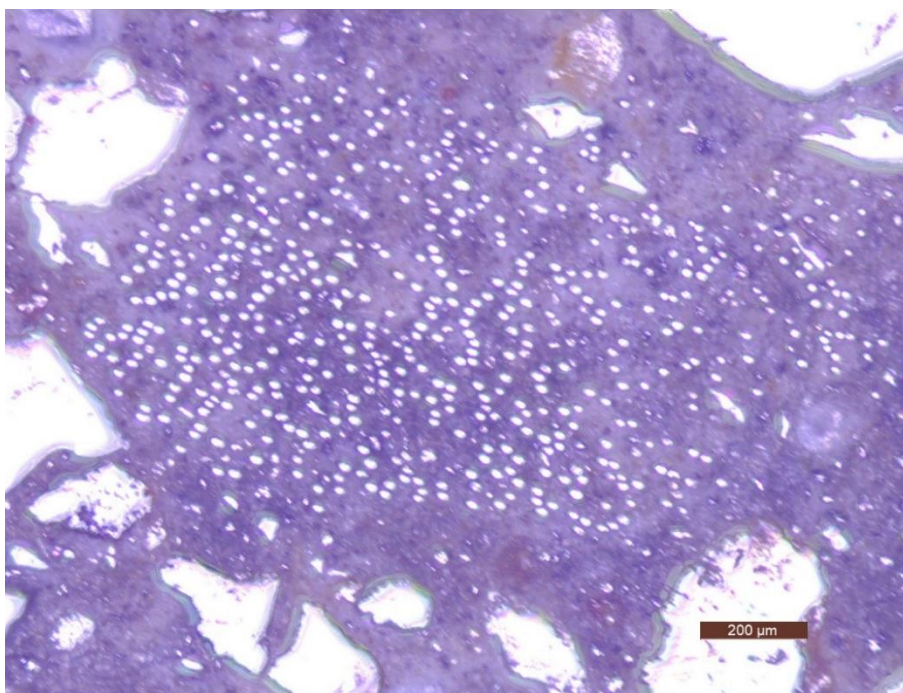


Obrázek 35 – Snímek z optického mikroskopu – shluk čedičových vláken v cementovém kompozitu

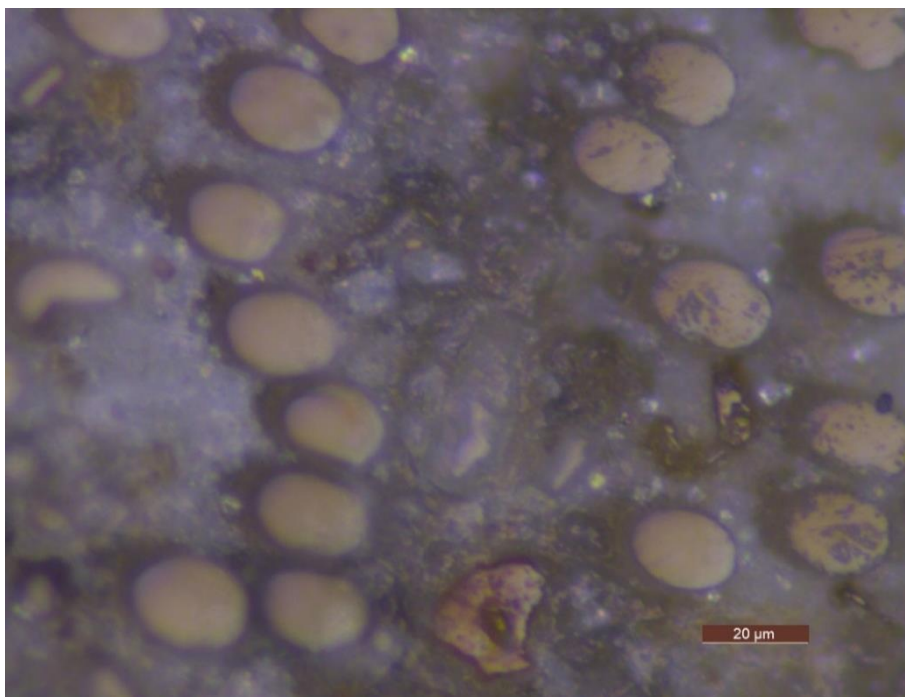
Na obrázku 36 můžeme vidět příčný řez shluku o menším počtu vláken. Obrázek 37 ukazuje podobný shluk, ovšem s větším počtem vláken. Na obrázku 38 je potom detailnější pohled na čedičová vlákna v cementovém kompozitu.



Obrázek 36 – Snímek z optického mikroskopu – menší shluk čedičových vláken v cementovém kompozitu



Obrázek 37 – Snímek z optického mikroskopu – větší shluk čedičových vláken v cementovém kompozitu



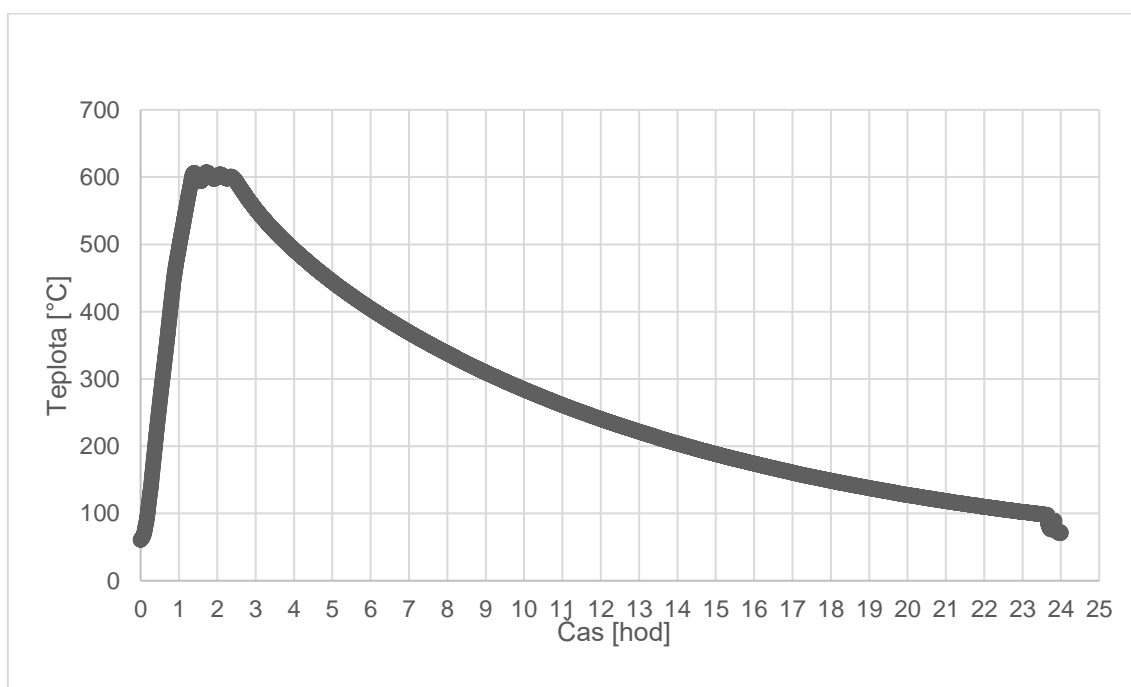
Obrázek 38 – Snímek z optického mikroskopu – čedičová vlákna v cementovém kompozitu

6.6.5 Zahřátí betonu na vysoké teploty

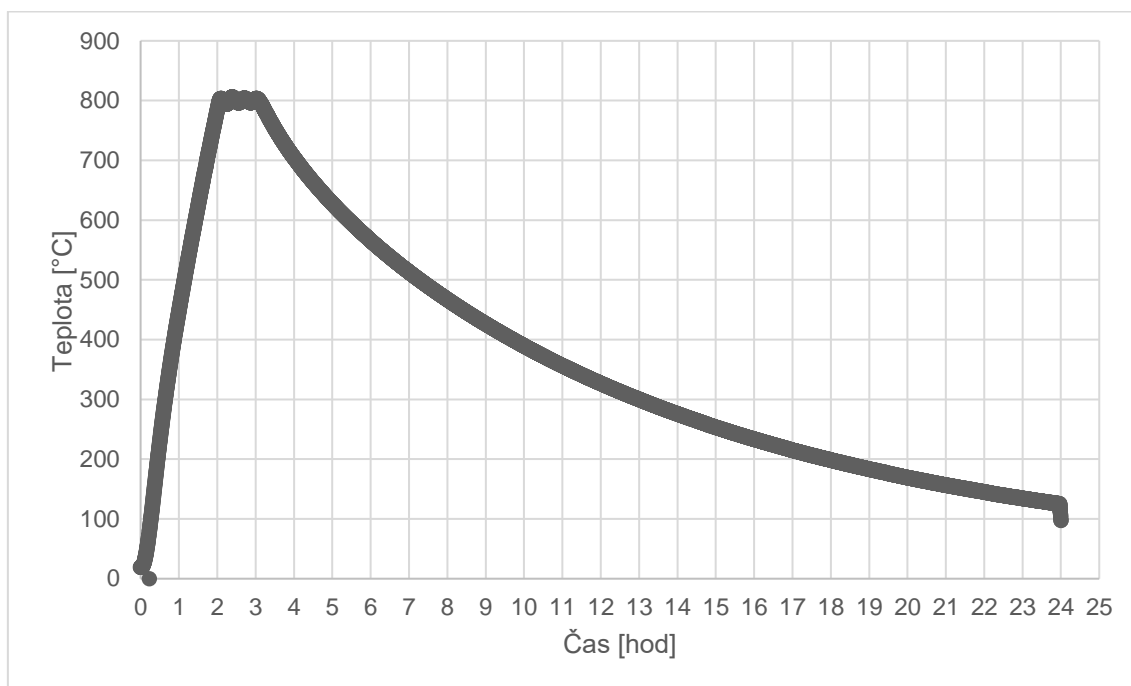
6.6.5.1 Záznam průběhu teploty při zahřívání

Následující grafy ukazují záznam teplot při zahřívání a volném chlazení vzorků zatěžovaných vysokou teplotou.

Graf 34 – Záznam teplot při zahřívání zkušebních vzorků na 600 °C



Graf 35 – Záznam teplot při zahřívání zkušebních vzorků na 800 °C

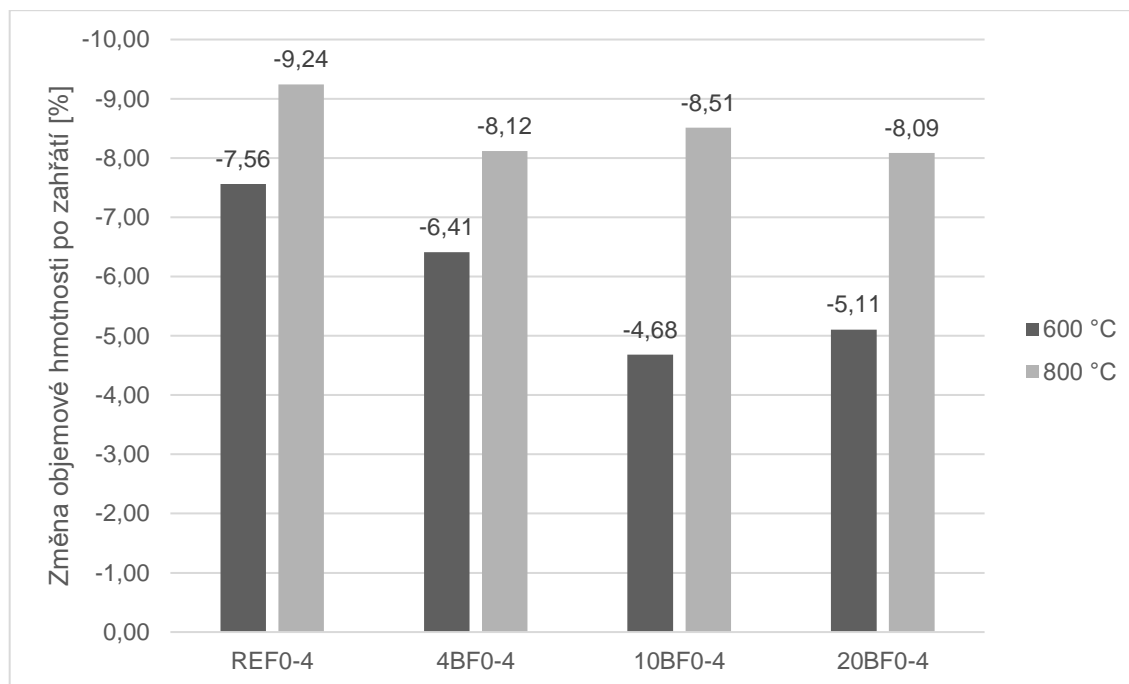


6.6.5.2 Změna objemové hmotnosti

Tabulka 25 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí

Označení směsi	Teplota [°C]	Před zahřátím	Po zahřátí	Změna objemové hmotnosti [%]
		D_{ZB} [kg·m ⁻³]	D_{ZB} [kg·m ⁻³]	
REF0-4	600	2 380	2 200	-7,56
	800		2 160	-9,24
4BF0-4	600	2 340	2 190	-6,41
	800		2 150	-8,12
10BF0-4	600	2 350	2 240	-4,68
	800		2 150	-8,51
20BF0-4	600	2 350	2 230	-5,11
	800		2 160	-8,09

Graf 36 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí

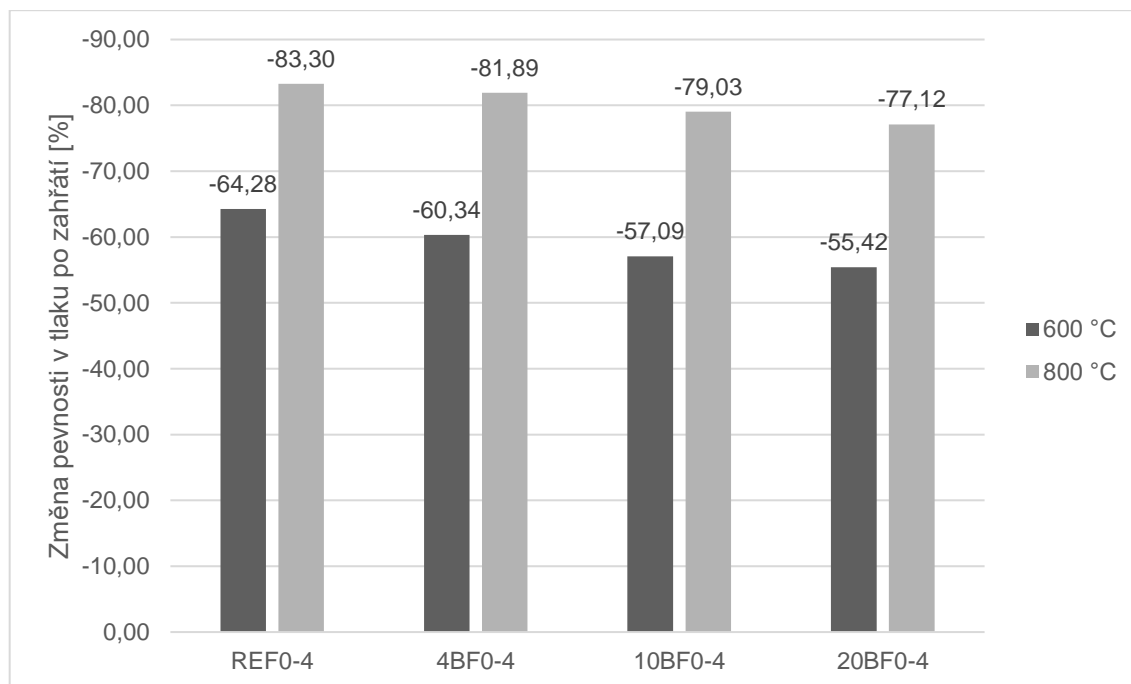


6.6.5.3 Změna pevnosti v tahu za ohybu

Tabulka 26 – Změna pevnosti v tahu za ohybu po zahřátí

Označení směsi	Teplota [°C]	Před zahřátím	Po zahřátí	Změna pevnosti v tahu za ohybu [%]
		f_{cf} [MPa]	f_{cf} [MPa]	
REF0-4	600	4,3	0,7	-83,27
	800		0,4	-91,20
4BF0-4	600	5,5	0,9	-83,20
	800		0,5	-90,43
10BF0-4	600	6,0	1,1	-80,92
	800		0,5	-92,35
20BF0-4	600	9,2	2,2	-75,74
	800		0,8	-91,72

Graf 37 – Změna pevnosti v tahu za ohybu po zahřátí

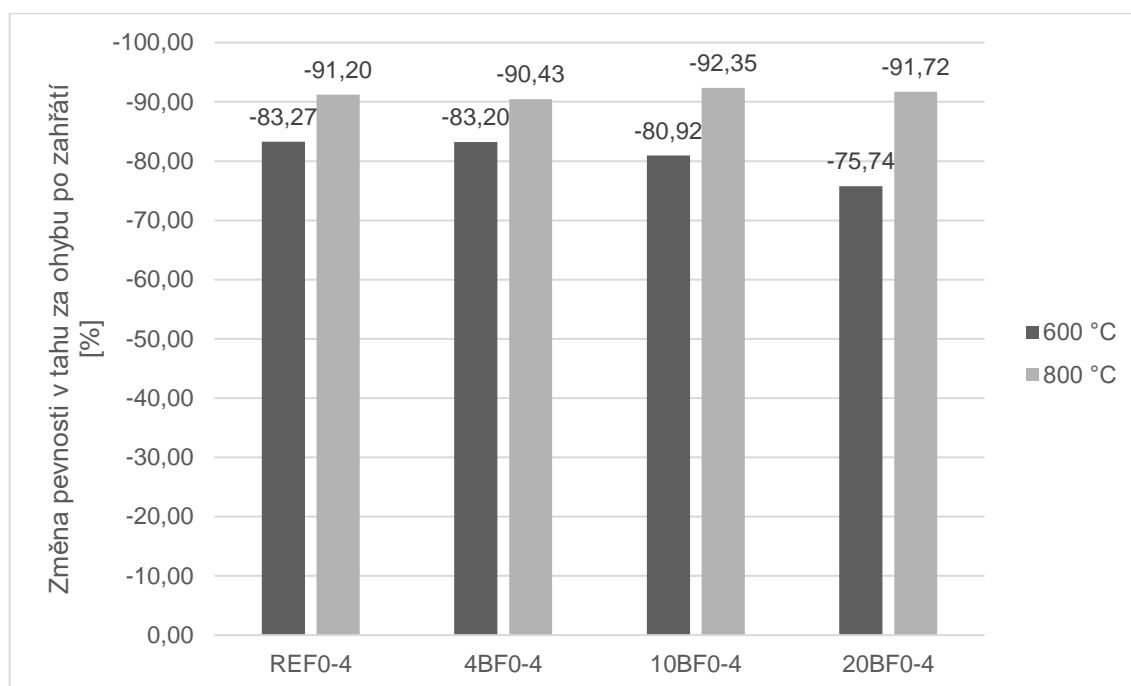


6.6.5.4 Změna pevnosti v tlaku

Tabulka 27 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí

Označení směsi	Teplota [°C]	Před zahřátím	Po zahřátí	Změna pevnosti v tlaku [%]
		f_c [MPa]	f_c [MPa]	
REF0-4	600	20,6	7,4	-64,28
	800		3,4	-83,30
4BF0-4	600	20,9	8,3	-60,34
	800		3,8	-81,89
10BF0-4	600	20,9	9,0	-57,09
	800		4,4	-79,03
20BF0-4	600	22,5	10,0	-55,42
	800		5,1	-77,12

Graf 38 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí



6.6.5.5 Vizuální posouzení

Vzhled vzorků se změnil u všech směsí stejným způsobem bez ohledu na množství přidaných vláken. Na vzorcích zahřátých na teplotu 600 °C se objevují místy trhliny. Nedochozí k barevné změně a povrchové vrstvy jsou soudržné. Vzorky zahřáté na teplotu 800 °C vykazují velké množství trhlin. Ze vzorků odpadávají povrchové vrstvy. Můžeme také pozorovat barevnou změnu – vzorky jsou světlejší.

6.6.5.5.1 Směs REF0-4



Obrázek 39 – Vzorky směsi REF0-4 po zahřátí na 600 °C



Obrázek 40 – Vzorky směsi REF0-4 po zahřátí na 800 °C

6.6.5.5.2 Směs 4BF0-4



Obrázek 41 – Vzorky směsi 4BF0-4 po zahřátí na 600 °C



Obrázek 42 – Vzorky směsi 4BF0-4 po zahřátí na 800 °C

6.6.5.5.3 Směs 10BF0-4



Obrázek 43 – Vzorky směsi 10BF0-4 po zahřátí na 600 °C



Obrázek 44 – Vzorky směsi 10BF0-4 po zahřátí na 800 °C

6.6.5.5.4 Směs 20BF0-4



Obrázek 45 – Vzorky směsi 20BF0-4 po zahřátí na 600 °C



Obrázek 46 – Vzorky směsi 20BF0-4 po zahřátí na 800 °C

6.7 Výsledky a diskuze

Některé odborné články [5] [21] ukazují experimenty s vysokými dávkami čedičových vláken. V druhé fázi, kterou popisuje etapa II této diplomové práce, byly proto testovány různé varianty cementového kompozitu s drobným těženým kamenivem frakce 0-4 mm a s množstvím vláken 4 (4BF0-4), 10 (10BF0-4) a 20 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (20BF0-4). Byla namíchána také jedna referenční směs bez vláken (REF0-4). V čerstvém stavu bylo sledováno zejména chování směsi při homogenizaci a schopnost vláken se rozdispergovat v celém objemu cementového kompozitu. Ve ztvrdlém stavu bylo cílem ověřit pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Vzorky všech směsí byly také zahřáty na teploty 600 a 800 °C a byla ověřena změna jejich objemové hmotnosti, změna pevnosti v tlaku, změna pevnosti v tahu za ohybu a změna vzhledu.

Výše uvedené směsi byly namíchány ručně v plastové misce pomocí špachtle. V průběhu míchání byla pozorována schopnost vláken rozmíchat se v celém objemu čerstvé směsi. Nejlépe rozmíchat šla vlákna v množství 4 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Po zamíchání nebyly viditelné žádné svazky vláken a všechna vlákna byla rozmíchána v celém objemu směsi. Směsi 10BF0-4 a 20BF0-4 šly rozmíchat hůře a s rostoucím množstvím vláken byl větší problém je rozmíchat. Navíc vlákna některá vlákna zůstávala ve svazcích a nedocházelo k jejich dispergaci v celém objemu směsi.

Se vzrůstajícím množstvím vláken rostla pevnost v tahu za ohybu. Vzorky směsi REF0-4 měli pevnost v tahu za ohybu 4,3 MPa, vzorky směsi 4BF0-4 5,5 MPa, vzorky směsi 10BF0-4 6,0 MPa a vzorky směsi 20BF0-4 s největší množstvím vláken měli pevnost v tahu za ohybu 9,2 MPa. Tím se potvrdil předpoklad, že větší množství vláken může mít vliv na tahové pevnosti. Vlákna naopak neměla významný vliv na pevnost v tlaku, která se pohybovala od 20,6 do 23,0 MPa.

Na vzorcích směsi 20BF0-4 byla ověřena přítomnost vláken pomocí optického mikroskopu. Bylo zjištěno, že vlákna jsou detekovatelná a tento způsob se jeví jako vhodný způsob ověření přítomnosti vláken a jejich rozdispergování ve ztvrdlém cementovém materiálu. Ze snímků je patrné, že některá vlákna zůstávala ve svazcích a shlucích a nebyla dostatečně rozmíchána.

Vzorky všech receptur byly zahřáty na teploty 600 a 800 °C a byl zkoumán vliv těchto teplot na změnu objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku a

na změnu vzhledu. Největší pokles objemové hmotnosti zaznamenaly vzorky směsi REF (7,56 % při 600 °C a 9,24 % při 800 °C). U vzorků směsí s vlákny byla změna objemové hmotnosti menší (6,41 % při 600 °C a 8,12 % při 800 °C pro 4BF0-4; 4,68 % při 600 °C a 8,58 % při 800 °C pro 10BF0-4; 5,11 % při 600 °C a 8,09 % při 800 °C pro 20BF0-4).

Patrnější byl vliv na změnu pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku a také na změny vzhledu vzorků zahřátých na vysoké teploty. Všechny vzorky zahřáté na 600 °C bez ohledu na množství vláken jsou poškozené trhlinami, které zřejmě nejsou jen povrchovým poškozením, ale prochází celým průřezem vzorku. Vzorky zahřáté na teplotu 800 °C jsou poškozeny ještě mnohem zřetelněji. Trhliny jsou větší a prochází celým průřezem vzorku. Vzorky také prošly barevnou změnou a jejich barva se změnila ne velmi světle šedou. Příčinou by mohlo být zbělání křemenného kameniva při teplotách kolem 800 °C. Povrchové vrstvy vzorků zahřátých na 800 °C jsou nesoudržné a dochází k jejich drolení a odpadávání.

Výše uvedené skutečnosti měly vliv na změnu pevností. Pevnost v tahu za ohybu klesala u všech vzorků na téměř nulové hodnoty a pokles se pohyboval od 75,74 po 83,27 % při teplotě 600 °C a od 90,43 po 92,35 % při teplotě 800 °C. Pevnost v tlaku klesala rovněž velmi výrazně. S rostoucím množstvím vláken pevnosti klesaly méně. Nejmenší pokles byl zaznamenán u vzorků směsi 20BF0-4 (55,42 % při 600 °C a 77,12 % při 800 °C), u vzorků směsi 10BF0-4 byl pokles 57,09 % při 600 °C a 79,03 % při 800 °C, u vzorků směsi 4BF0-4 60,34 % při 600 °C a 81,89 % při 800 °C. Největší pokles pevnosti v tlaku byl zaznamenán u směsi REF bez vláken a to 64,28 % při 600 °C a 83,30 % při 800 °C.

V. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala čedičovými vlákny a jejich použitím v betonu, nebo obecněji v cementových vláknových kompozitech. Cílem bylo vyhodnotit jejich vliv na vlastnosti jak čerstvého, tak i ztvrdlého betonu. Úkolem bylo také ověřit vliv čedičových vláken na odolnost těchto materiálů proti vysokým teplotám.

Současný stav výzkumu potvrzuje, že použití čedičových vláken v betonu může mít dobrý vliv na mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu, zejména potom na tahové pevnosti a houževnatost materiálu. Dostupná zahraniční literatura zatím podrobně nezpracovává problematiku vlivu čedičových vláken na požární odolnost betonu. Jediným zdrojem v tomto ohledu je výzkum, který zpracovala Ing. Iveta Nováková a doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D. na Fakultě stavební VUT v Brně. Ten ukazuje pozitivní vliv čedičových vláken na odolnost betonu proti působení vysokých teplot.

V této diplomové práci bylo zjištěno, že se zvyšující se dávkou čedičových vláken se zhoršuje zpracovatelnost čerstvého betonu a také schopnost vláken se rozmíchat. Naopak nebyl potvrzen vliv na obsah vzduchu v čerstvém betonu. Mechanické vlastnosti betonu se s přidáním čedičových vláken výrazně neměnily. U jemnozrnného cementového kompozitu s čedičovými vlákny však poměrně významně rostla pevnost v tahu za ohybu se zvyšujícím se množstvím vláken. To potvrzuje předpoklad, že vyšší dávky čedičových vláken nad $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ mohou výrazně zlepšovat tahové pevnosti zejména jemnozrnných cementových kompozitů.

Z hlediska požární odolnosti betonu s čedičovými vlákny nebyl v této práci potvrzen fakt, že by čedičová vlákna v betonu zamezovala klesání pevnosti v tlaku po vystavení působení vysokých teplot. Výjimku tvořily vzorky směsi s $2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ čedičových vláken zahřáté na teplotu 600°C , kde byl pokles tlakové pevnosti 5,02 %. Při zahřívání na teplotu 800°C klesalo maximální rozpínání vzorků se vzrůstajícím množstvím vláken.

Naopak u jemnozrnných cementových kompozitů s větším množstvím vláken se pozitivní vliv čedičových vláken na jejich požární odolnost nepodařilo prokázat. Vzorky byly viditelně poškozené, objevovaly se na nich trhliny a po zahřátí na 800°C docházelo k drolení povrchové vrstvy a byla viditelná barevná změna vzorků.

Vzorky jemnozrnného cementového kompozitu s čedičovými vlákny byly po vystavení vysokým teplotám viditelně porušeny více než vzorky betonu s čedičovým kamenivem. Ačkoliv to nebylo cílem této práce, potvrdil se zde pozitivní vliv čedičového kameniva, které je tepelně stabilní do teplot okolo 900 °C, zatímco v běžném kamenivu obsahujícím křemen dochází k praskání kameniva při teplotách kolem 350 °C a k modifikačním přeměnám při teplotě 573 °C. To je v souladu s výsledky uvedenými v [25].

Výzkumy přisuzují betonu s čedičovými vlákny velmi dobré užité vlastnosti, jak je uvedeno v teoretické části této práce. Ne ve všech oblastech se podařilo tyto vlastnosti v experimentální části této práce prokázat. Nicméně bylo dosaženo výrazného zlepšení pevnosti v tahu za ohybu u jemnozrnných cementových kompozitů s čedičovými vlákny. Bylo také prokázáno omezení deformace při zahřívání betonů s čedičovými vlákny. Podrobnější výzkum by mohl přinést další významné výsledky zejména v oblasti tahových pevností a požární odolnosti.

VI. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I*. Brno: VUT Brno, 2005.
- [2] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály*. Brno: VUT Brno, 2007. Studijní opory.
- [3] HELA, Rudolf. *Technologie betonu 2*. Brno: VUT Brno, 2007.
- [4] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [5] JALASUTRAM, Sruthi, Dipti SAHOO a Vasant MATSAGAR. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete. *Structural Concrete* [online]. 2017, **18**(2), 292-302 [cit. 2017-10-19]. DOI: 10.1002/suco.201500216. ISSN 14644177. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/suco.201500216>
- [6] Polymerová Vlákna BeneSteel - Sklocement Beneš, s.r.o. *Sklocement Beneš, s.r.o.* [online]. 2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.sklocement.cz/polymerova-vlakna-benesteel/>
- [7] YIN, Shi, Rabin TULADHAR, Feng SHI, Mark COMBE, Tony COLLISTER a Nagaratnam SIVAKUGAN. Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, (93), 180-188 [cit. 2017-02-24]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815006194>
- [8] Bazalt. *Geologická encyklopedie* [online]. Brno: Česká geologická služba, 2007 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?bazalt>
- [9] FIORE, V., T. SCALICI, G. DI BELLA a A. VALENZA. A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015,

- (74), 74-94 [cit. 2017-09-22]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.034. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815000062>
- [10] OSNOS, Sergey. Basalt continuous fiber: development of technologies and equipment from the past to the present. *BASALT FIBER & COMPOSITE MATERIALS TECHNOLOGY DEVELOPMENT* [online]. 2006 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://basaltfm.com/eng/articles/article01.html>
- [11] Natural gift - Basalt. *Basalt continuous fibers materials production* [online]. Shanghai: Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development, 2014 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: http://basaltfm.com/eng/row_basalt.html
- [12] Basfiber® for construction. In: *Basfiber* [online]. Moskva: Kamenny Vek, b.r. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.basfiber.com/Sites/basfiber/Uploads/Basfiber%20for%20construction%20%28SI%29.8A53BF0AC6BB4E2C801A5CF5485F4E15.pdf>
- [13] Basalt Continuous Fiber (BCF) production techniques. *Basalt continuous fibers materials production* [online]. Shanghai: Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development, 2014 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://basaltm.com/en/tehnologii/basalt-continuous-fiber-bcf-production-techniques.html>
- [14] Basalt continuous fibers materials production. *Basalt continuous fibers materials production* [online]. Shanghai: Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development, 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://basaltm.com/en/bazaltovye-porody/basalt-continuous-fibers-materials-production.html>
- [15] Catalogue. In: *Basfiber* [online]. Moskva: Kamennyj Vek, 2016 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.basfiber.com/src/catalogue.pdf>
- [16] NOVÁKOVÁ, Iveta a Lenka BODNÁROVÁ. High Strength Concrete with Enhanced Properties by Addition of Chopped Basalt Fibres. *Konference Maltoviny 2016*. 2016.

- [17] SIM, Jongsung, Cheolwoo PARK a Do MOON. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2005, **36**(6-7), 504-512 [cit. 2017-03-31]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836805000454>

- [18] YING, Shuni a Xiaodong ZHOU. Chemical and thermal resistance of basalt fiber in inclement environments. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* [online]. 2013, **28**(3), 560-565 [cit. 2017-10-20]. DOI: 10.1007/s11595-013-0731-4. ISSN 1000-2413. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11595-013-0731-4>

- [19] FÖRSTER, T, G SOMMER, E MÄDER a C SCHEFFLER. Surface, interphase and tensile properties of unsized, sized and heat treated basalt fibres. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2016, **139**, 012019- [cit. 2017-10-20]. DOI: 10.1088/1757-899X/139/1/012019. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/139/i=1/a=012019?key=crossref.0c6f6e669e2ef27dae4d36ce26b76eae>

- [20] Basalt Continuous Fiber. *Basalt continuous fibers materials production* [online]. Shanghai: Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development, 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://basaltm.com/en/bnv/basalt-continuous-fiber.html>

- [21] JIANG, Chaohua, Ke FAN, Fei WU a Da CHEN. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials* [online]. 2014, (58), 187-193 [cit. 2017-09-28]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.01.056. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914000855>

- [22] KABAY, Nihat. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **50**, 95-101

- [cit. 2017-10-19]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813008805>
- [23] BRANSTON, John, Sreekanta DAS, Sara Y. KENNO a Craig TAYLOR. Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2016, (74), 182-190 [cit. 2017-11-03]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.10.004. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095894651630600X>
- [24] HAGER, Izabela. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* [online]. 2013, **61**(1), - [cit. 2017-11-02]. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013. ISSN 0239-7528. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/bpasts.2013.61.issue-1/bpasts-2013-0013/bpasts-2013-0013.xml>
- [25] VÁLEK, Jaroslav. *Výzkum a vývoj kompozitních materiálů s vyšší rezistencí vůči působení vyšších teplot*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [26] ARIÖZ, Omer. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal* [online]. 2007, **42**(8), 516-522 [cit. 2017-10-27]. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.01.003. ISSN 03797112. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711207000148>
- [27] HAGER, Izabela. *Behavior of high performance concretes at high temperature - evolution of mechanical properties*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004. PhD thesis (in french).
- [28] YÜZER, Nabi, Fevziye AKÖZ a Leyla ÖZTÜRK. Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, **34**(10), 1803-1807 [cit. 2017-11-02]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.015. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000389>

- [29] REICHEL, Vladimír. *Hodnoty požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: VÚPS, 1971.
- [30] OZAWA, Mitsuo, Shinya UCHIDA, Toshiro KAMADA a Hiroaki MORIMOTO. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, (37), 621-628 [cit. 2017-10-28]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181200462X>
- [31] *Technický list CEM I 42,5*. Českomoravský cement, a.s., 2017.
- [32] *Kontrolní roční zkoušky kameniva: Interní materiál firmy KAMENOLOMY ČR, s.r.o.* Hořice: Zkušebna kamene a kameniva, 2016.
- [33] *Technical Data Sheet BCS D-L-X*. Wevelgem, Belgium: Basaltex, 2016.
- [34] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [35] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [36] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [37] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [38] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [39] *Výzkumné centrum AdMaS* [online]. Brno: AdMaS, 2018 [cit. 2018-01-09].
Dostupné z: <http://www.admas.eu/>

VII. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Schéma přenosu napětí vyztuženého a nevyztuženého profilu [2]..	15
Obrázek 2 – Schéma výroby čedičových vláken [13].....	19
Obrázek 3 – Schéma výroby čedičových vláken [9].....	19
Obrázek 4 – Zařízení s průchodkami na výrobu čedičových vláken [15]	20
Obrázek 5 – Čedičová vlákna ve formě rovingu [13]	21
Obrázek 6 – Čedičové vlákno po uložení v roztoku NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ při teplotě 100 °C. Doba uložení: (a) 1 hodina, (b) 6 hodin, (c) 24 hodin [18]	24
Obrázek 7 – Nasekaná čedičová vlákna.....	29
Obrázek 8 – Porušení vzorků při zkoušce pevnosti v tlaku [5].....	35
Obrázek 9 – Výskyt smršťovacích trhlin při různých dávkách čedičových vláken [23]	39
Obrázek 10 – Mikrostruktura rozhraní čedičového vlákna a cementové matrice po 7 dnech [21].....	39
Obrázek 11 – Mikrostruktura rozhraní čedičového vlákna a cementové matrice po 28 dnech [21].....	40
Obrázek 12 – Barevná změna povrchu betonu a kameniv při působení různých teplot [24].....	45
Obrázek 13 – Mikrostruktura betonu zahřátého na 600 °C [24]	45
Obrázek 14 – Explosivní odprýsknutí betonu v důsledku vysokého tlaku vodní páry [30]	48
Obrázek 15 – Explosivní odprýsknutí betonu v důsledku teplotního gradientu [30]	49
Obrázek 16 – Čedičové kamenivo frakce 0-4 mm	55
Obrázek 17 – Čedičové kamenivo frakce 4-8 mm	55
Obrázek 18 – Čedičové kamenivo frakce 8-16 mm	56
Obrázek 19 – Čedičová vlákna	57
Obrázek 20 – Použitá laboratorní míchačka	59
Obrázek 21 – Použitá laboratorní pec se zařízením na měření deformace	63
Obrázek 22 – Vzorek směsi REF po zahřátí na 600 °C	76
Obrázek 23 – Vzorek směsi REF po zahřátí na 800 °C	76
Obrázek 24 – Vzorek směsi 2,5BF po zahřátí na 600 °C	77
Obrázek 25 – Vzorek směsi 2,5BF po zahřátí na 800 °C	77

Obrázek 26 – Vzorek směsi 4BF po zahřátí na 600 °C	77
Obrázek 27 – Vzorek směsi 4BF po zahřátí na 800 °C	77
Obrázek 28 – Drobné těžené kamenivo frakce 0-4 mm.....	81
Obrázek 29 – Optický mikroskop Leica DM4000 M LED [39]	86
Obrázek 30 – Nerozmíchaná vlákna s čerstvé směsi 20BF0-4	87
Obrázek 31 – Rozmíchaná vlákna v čerstvé směsi 20BF0-4	87
Obrázek 32 – Detail rozmíchaných vláken v čerstvé směsi 4BF0-4	88
Obrázek 33 – Detail rozmíchaných vláken v čerstvé směsi 20BF0-4	88
Obrázek 34 – Snímek z optického mikroskopu – čedičové vlákno v cementovém kompozitu	92
Obrázek 35 – Snímek z optického mikroskopu – shluk čedičových vláken v cementovém kompozitu	92
Obrázek 36 – Snímek z optického mikroskopu – menší shluk čedičových vláken v cementovém kompozitu	93
Obrázek 37 – Snímek z optického mikroskopu – větší shluk čedičových vláken v cementovém kompozitu	93
Obrázek 38 – Snímek z optického mikroskopu – čedičová vlákna v cementovém kompozitu	94
Obrázek 39 – Vzorky směsi REF0-4 po zahřátí na 600 °C	99
Obrázek 40 – Vzorky směsi REF0-4 po zahřátí na 800 °C	99
Obrázek 41 – Vzorky směsi 4BF0-4 po zahřátí na 600 °C	99
Obrázek 42 – Vzorky směsi 4BF0-4 po zahřátí na 800 °C	99
Obrázek 43 – Vzorky směsi 10BF0-4 po zahřátí na 600 °C	100
Obrázek 44 – Vzorky směsi 10BF0-4 po zahřátí na 800 °C	100
Obrázek 45 – Vzorky směsi 20BF0-4 po zahřátí na 600 °C	100
Obrázek 46 – Vzorky směsi 20BF0-4 po zahřátí na 800 °C	100

VIII. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Porovnání vlastností vybraných typů vláken [5]	14
Tabulka 2 – Chemické složení čediče podle dvou různých autorů [9]	17
Tabulka 3 – Chemická odolnost čedičového vlákna Basfiber® [12]	23
Tabulka 4 – Porovnání vlastností skleněných a čedičových vláken [15].....	25
Tabulka 5 – Porovnání vlastností čedičových, skleněných a uhlíkových vláken [20]	25
Tabulka 6 – Změny ve struktuře betonu, ke kterým dochází při zahřívání [27]....	42
Tabulka 7 – Chemické vlastnosti použitého cementu [31]	53
Tabulka 8 – Vlastnosti použitého čedičového kameniva [32]	54
Tabulka 9 – Vlastnosti použitých čedičových vláken [16] [33]	56
Tabulka 10 – Složení směsi REF	57
Tabulka 11 – Složení směsi 2,5BF	58
Tabulka 12 – Složení směsi 4BF	58
Tabulka 13 – Třídy konzistence sednutím kužele [34]	60
Tabulka 14 – Vlastnosti v čerstvém stavu	63
Tabulka 15 – Vlastnosti ve ztvrdlém stavu	65
Tabulka 16 – Souhrn deformací všech vzorků vystavených vysokým teplotám ..	74
Tabulka 17 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí	74
Tabulka 18 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí	75
Tabulka 19 – Složení směsi REF0-4	82
Tabulka 20 – Složení směsi 4BF0-4	82
Tabulka 21 – Složení směsi 10BF0-4	82
Tabulka 22 – Složení směsi 20BF0-4	83
Tabulka 23 – Objemová hmotnost v čerstvém stavu	89
Tabulka 24 – Vlastnosti ve ztvrdlém stavu	89
Tabulka 25 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí	96
Tabulka 26 – Změna pevnosti v tahu za ohybu po zahřátí	97
Tabulka 27 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí	98

IX. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Změna hmotnosti vláken v závislosti na teplotě [19]	22
Graf 2 – Změna pevnosti v tahu vláken při působení roztoku NaOH o koncentraci $c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ při teplotě 100 °C [18]	24
Graf 3 – Pracovní diagramy čedičových a skleněných vláken [9]	26
Graf 4 – Změna pevnosti v tahu čedičových vláken v závislosti na teplotě a délce působení teploty [9]	28
Graf 5 – Vliv množství vláken na zpracovatelnost čerstvého betonu [21]	30
Graf 6 – Pevnost betonu v tlaku s různým množstvím vláken [22]	32
Graf 7 – Vývoj pevností v tlaku betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 12 mm [21]	33
Graf 8 – Vývoj pevností v tlaku betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 22 mm [21]	33
Graf 9 – Vliv množství vláken na pevnost v tlaku betonu po 28 dnech [5]	34
Graf 10 – Pevnost betonu v tahu ohybem s různým množstvím vláken [22]	36
Graf 11 – Vývoj pevností v tahu ohybem betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 12 mm [21]	36
Graf 12 – Vývoj pevností v tahu ohybem betonu s různými dávkami čedičových vláken délky 22 mm [21]	37
Graf 13 – Vliv množství vláken na pevnost v tahu ohybem betonu po 28 dnech [5]	38
Graf 14 – Pevnost v tlaku betonu s čedičovými vlákny a bez vláken po vystavení vysokým teplotám [16]	41
Graf 15 – DTA analýza čtyř typů kameniva zahříváných rychlostí 10 °C/min [24]	44
Graf 16 – Vliv teploty na pevnost betonu v tlaku [29]	46
Graf 17 – Vliv teploty na modul pružnosti betonu [29]	47
Graf 18 – Křivka zrnitosti použitého čedičového kameniva frakce 0-4 mm [32] ...	53
Graf 19 – Křivka zrnitosti použitého čedičového kameniva frakce 4-8 mm [32] ...	54
Graf 20 – Křivka zrnitosti použitého čedičového kameniva frakce 8-16 mm [32] .	54
Graf 21 – Vliv množství vláken na sednutí kužele	64
Graf 22 – Vliv množství vláken na obsah vzduchu v čerstvém betonu	64
Graf 23 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost čerstvého betonu	65
Graf 24 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost ztvrdlého betonu	66
Graf 25 – Vliv množství vláken na pevnost betonu v tlaku po 28 dnech	66

Graf 26 – Vliv množství vláken na pevnost betonu v tahu ohybem po 28 dnech .	67
Graf 27 – Závislost maximálních dosažených deformací na teplotě	74
Graf 28 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí	75
Graf 29 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí	76
Graf 30 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost čerstvého betonu	89
Graf 31 – Vliv množství vláken na objemovou hmotnost ve ztvrdlém stavu.....	90
Graf 32 – Vliv množství vláken na pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech	90
Graf 33 – Vliv množství vláken na pevnost v tlaku po 28 dnech	91
Graf 34 – Záznam teplot při zahřívání zkušebních vzorků na 600 °C	94
Graf 35 – Záznam teplot při zahřívání zkušebních vzorků na 800 °C	95
Graf 36 – Změna objemové hmotnosti po zahřátí	96
Graf 37 – Změna pevnosti v tahu za ohybu po zahřátí	97
Graf 38 – Změna pevnosti v tlaku po zahřátí	98

X. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PP – polypropylen

PVA – polyvinylalkohol

BMC – metoda výroba FRC, lisování ve formě (z anglického Bulk Moulding Compound)

SMC – metoda výroba FRC, lisování ve formě (z anglického Shield-molded Composite)

FRP – vláknový kompozitní materiál s polymerní matricí (z anglického Fiber Reinforced Plastics)

BFRC – beton vyztužený čedičovými vlákny (z anglického Basalt Fiber Reinforced Concrete)

SEM – elektronový rastrovací mikroskop (z anglického Scanning Electron Microscope)

CSH – kalciumhydrosilikát

C₂S – belit, dicalciumsilikát

XI. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Technický list cement CEM I 42,5 R

Příloha 2 – Technický list vlákna Basaltex BCS17-25.4-KV13

Příloha 3 – Kontrolní roční zkoušky čedičového kameniva z kamenolomu Bílčice

CEM I 42,5 R

Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list
září 2017



Charakteristické vlastnosti:

- rychlý nárůst pevností
- vysoká počáteční pevnost
- vysoká konečná pevnost
- rychlý vývin hydratačního tepla
- vyšší celkové hydratační teplo

Kvalita, bezpečnost, ekologie:

Kvalita výrobků, respekt k životnímu prostředí, důraz na bezpečnost zaměstnanců a hospodárné využívání energetických zdrojů patří k našim hlavním prioritám. Plnění požadavků příslušných systémů managementu je potvrzeno vydanými certifikáty:

- Management kvality ČSN EN ISO 9001
- Management bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ČSN OHSAS 18001
- Environmentální management ČSN EN ISO 14001
- Management hospodaření s energií ČSN EN ISO 50001



Způsob dodání:

- volně ložený v autocisternách nebo železničních vagonch Raj
- balený v papírových pytlích 25 kg s polyetylenovou vložkou, na vratných paletách o celkové hmotnosti 1,4 t

Obsah složek		
Hlavní složka	Portlandský slínek	95–100 %
Doplňující složka		0–5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří siran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

CEM I 42,5 R

Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

Technický list
září 2017

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti			
Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr		Průměrná hodnota	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1	Obsah [%]	CaO	64,2	EN 196-2
	2 dny	29	EN 196-1		SiO ₂	19,5	EN 196-2
	7 dní	53	EN 196-1		Al ₂ O ₃	4,7	EN 196-2
	28 dní	61	EN 196-1		Fe ₂ O ₃	3,2	EN 196-2
	56 dní	66	EN 196-1		MgO	1,3	EN 196-2
	90 dní	67	EN 196-1		SO ₃	3,2	EN 196-2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1		Cl ⁻	0,047	EN 196-2
	2 dny	6	EN 196-1		K ₂ O	0,78	EN 196-2
	7 dní	8	EN 196-1		Na ₂ O	0,09	EN 196-2
	28 dní	9	EN 196-1		Na ₂ O ekvivalent [%]	0,6	EN 196-2
	56 dní	9	EN 196-1		Nerostný zbytek [%]	0,8	EN 196-2
	90 dní	9	EN 196-1		Ztráta žháním [%]	3,2	EN 196-2
Normální konzistence [%]		27,8	EN 196-3	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr ⁶⁺ v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).			
Počátek tuhnutí [min]		219	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]		286	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]		0,8	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m ² kg ⁻¹]		374	EN 196-6, Blaine				
Měrná hmotnost [kg m ⁻³]		3110	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v autocisterně		980	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.				
Sypná hmotnost [kg m ⁻³] - v síle		1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.				
Hydratační teplo [J g ⁻¹]	7 dní	310	EN 196-8				

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonatací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^{a)}	✓ ^{a)}	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO₄²⁻ vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO₄²⁻ - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou pucolánové příměsi (například alespoň 20 % popílku).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

Českomoravský cement, a.s.
Technická podpora prodeje
technicka.podpora@cmcem.cz
+420 544 122 544

www.cmcem.cz

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

Technical Data Sheet



BCS D-L-X

Basalt continuous filament roving is chopped to lengths for reinforcement of composites and production of mats.

Identification & Application

BCS :	Basalt Chopped Strand
The first code D indicates the monofilament diameter (μm) :	13-19
The second code L indicates the chop length (mm) :	3,2 / 6,35 / 12,7 / 25,4 / 50,8
The third code X indicates the sizing:	Various

The good mechanical properties of BCS, the easy wetting of the filament surface make them particularly suitable for composite applications.

Different sizings are available for optimal compatibility with the used thermoset or thermoplastic resin.

Base Properties

Property	Standard/Method	Unit	Value
Base material			
Density of unsized filament		kg/dm ³	2.67
Melting point		°C	1350
Continuous temperature range		°C	-250 to 550; 1200°C fire barrier
Sizing Type			silane
Moisture content (sized roving)*	ISO 3344:1997	wt%	≤ 0.1
LOI, also sizing content	ISO 1887:1995**	wt%	≥ 0.4
Combustibility	NF P92-503 (1995)	M0	Pass
UV stability	ISO 105-B02		>7

*after drying according ISO 3344:1997

Specific Properties

Property	Standard/Method	Unit	Value
Monofilament diameter range**	ASTM D578-2000 - §26	μm	13-19
Cut Length (mm)**:		mm	3,2-50,8

*after drying according ISO 3344:1997

**depending on selected product

Note: Moisture content, LOI, Monofilament Diameter and cut length are given on the "Certificate of Conformance" coming with each product delivery.

Packaging

The chopped basalt filaments are put in a PP bags inside a hexagonal cardboard box, with identification label. The box is securely strapped to a pallet. Total weight is ± 500 kg. On request, the chopped basalt filaments might be available in bags of 20 – 25kg.

Product Stability:

BASALTEX® Products have not been designed for full external exposure conditions and cannot be guaranteed for use in such situations. However, these BASALTEX® products have considerable tolerance to damp conditions and occasional water immersion. After drying out, the product will give the same level of performance as the original sample.

Stability over time:

All evidence obtained to date indicates that the performance should not significantly change over a significant period of time when said products are not subjected to excessive heat, wear and abrasion. It is the responsibility of the developer of the end-product, finished device or system to test its performance in the end-application.

February 2016

BASALTEX NV | Zuidstraat 18 | 8560 Wevelgem | Belgium
Tel. +32(0)56 43 00 92 | info@basaltex.com | www.basaltex.com

PŘÍLOHA 3

Zkušebna kamene a kameniva, s.r.o.
Husova 675, 508 01 Hořice

Protokol o zkouškách č.: 894/17
Strana 5 / 11

4. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK KAMENIVA - KONTROLNÍ ZKOUŠKY ROČNÍ

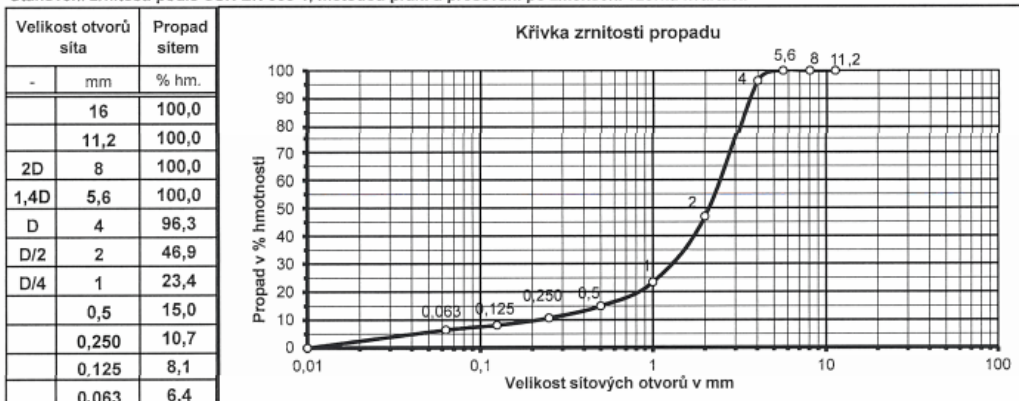
DRČENÉ KAMENIVO frakce (d/D) 0/4

Zakázka čis. : 894/17
Provozovna : BÍLČICE
Hornina : Čedič

Místo odběru : Z výroby
Datum odběru : 11.5.2017
Odběr provedl za ZL : M. Semian

Vzorek číslo : 2304/17
Zástupce klienta : R. Pavlas

Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1, metodou prání a prosévání po zmenšení vzorku kvartací.



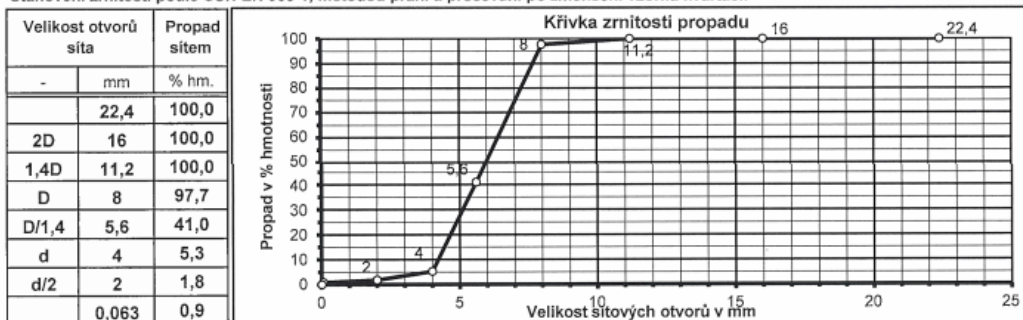
Vlastnost	Zkušební metoda	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic f	ČSN EN 933-1	% hm.	6,4	
Zkouška methylenovou modří MB_F	ČSN EN 933-9+A1	g/kg	1,7	
Zkouška ekvivalentu písku SE_4	ČSN EN 933-8+A1, příloha A	-	62	
Mez plasticity w_p	ČSN CEN ISO/TS 17892-12	%	-	
Mez tekutosti w_L		%	-	
Index plasticity I_p		%	-	
Potenciální přítomnost humusu	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 15.1	-	Negativní zkouška	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 8	% hm.	< 0,001	
Obsah síranů rozpustných v kyselině AS	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 12	% hm.	0,012	
Obsah celkové síry S	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 11	% hm.	0,016	
Obsah vodou rozpustných síranů SS	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 10	% hm.	0,003	
Nasákavost WA_{24}	ČSN EN 1097-6	% hm.	0,9	
Lehké znečišťující částice m_{LPC}	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 14.2	% hm.	0,0	
Objemová hmotnost ρ_{td}	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,948	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,650	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3, příl. D	Mg/m ³	2,001	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	%	44,0	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3, příl. D	%	32,1	



PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK KAMENIVA - KONTROLNÍ ZKOUŠKY ROČNÍ
HRUBÉ DRCENÉ KAMENIVO frakce (d/D) 4/8

Zakázka čís. : 894/17 Místo odběru : Z výroby Vzorek číslo : 2305/17
Provozovna : BÍLČICE Datum odběru : 11.5.2017
Hornina : Čedič Odběr provedl za ZL : M. Semian Zástupce klienta : R. Pavlas

Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1, metodou praní a prosévání po zmenšení vzorku kvartací.



Vlastnost	Zkušební metoda	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic <i>f</i>	ČSN EN 933-1	% hm.	0,9	
Tvarový index <i>S_I</i>	ČSN EN 933-4	% hm.	14,6	
Podíl zrn ostrohranných	ČSN EN 933-5	% hm.	100	
Odolnost proti drcení <i>LA</i> ¹⁾	ČSN EN 1097-2, kap. 5	-	13,7	
Ohladitelnost <i>PSV</i> ²⁾	ČSN EN 1097-8	-	55	
Nasákavost <i>WA</i> ₂₄	ČSN EN 1097-6	% hm.	0,9	
Zkouška síranem hořečnatým <i>MS</i>	ČSN EN 1367-2	% hm.	-	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování <i>F</i> ¹⁾	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,3	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 8	% hm.	< 0,001	
Obsah síranů rozpustných v kyselině <i>AS</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 12	% hm.	0,012	
Obsah celkové síry <i>S</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 11	% hm.	0,016	
Obsah vodou rozpustných síranů <i>SS</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 10	% hm.	0,003	
Lehké znečišťující částice <i>m_{LPC}</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 14.2	% hm.	0,0	
Objemová hmotnost <i>ρ_{rd}</i>	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,943	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,349	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3, příl. D	Mg/m ³	1,605	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	%	54,1	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3, příl. D	%	45,5	
Rozpad čediče "Sonnenbrand" ¹⁾				
- ztráta hmotnosti po zkoušce varem	ČSN EN 1367-3	% hm.	0,3	
- zvýšení součinitele <i>LA</i>	ČSN EN 1097-2, kap. 5	-	2,6	

¹⁾ Zkouška byla provedena na vytříděném podílu 10/14.

²⁾ Zkouška byla provedena na vytříděném podílu 8/11.



PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK KAMENIVA - KONTROLNÍ ZKOUŠKY ROČNÍ

HRUBÉ DRCENÉ KAMENIVO frakce (d/D) 8/16

Zakázka čís. : 894/17 Místo odběru : Z výroby Vzorek číslo : 2307/17
Provozovna : BÍLČICE Datum odběru : 11.5.2017
Hornina : Čedič Odběr provedl za ZL : M. Semian Zástupce klienta : R. Pavlas

Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1, metodou praní a prosévání po zmenšení vzorku kvartací.



Vlastnost	Zkušební metoda	Jednotky	Hodnota	Poznámka
Obsah jemných částic <i>f</i>	ČSN EN 933-1	% hm.	0,8	
Tvarový index <i>S</i>	ČSN EN 933-4	% hm.	13,5	
Podíl zrn ostrohranných	ČSN EN 933-5	% hm.	100	
Odolnost proti drcení <i>LA</i> ¹⁾	ČSN EN 1097-2, kap. 5	-	13,7	
Ohladitelnost <i>PSV</i> ²⁾	ČSN EN 1097-8	-	55	
Nasákavost <i>WA</i> ₂₄	ČSN EN 1097-6	% hm.	0,8	
Zkouška síranem hořečnatým <i>MS</i>	ČSN EN 1367-2	% hm.	-	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování <i>F</i> ¹⁾	ČSN EN 1367-1	% hm.	0,3	
Obsah chloridových solí	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 8	% hm.	< 0,001	
Obsah síranů rozpustných v kyselině <i>AS</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 12	% hm.	0,012	
Obsah celkové síry <i>S</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 11	% hm.	0,016	
Obsah vodou rozpustných síranů <i>SS</i>	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 10	% hm.	0,003	
Lehké znečišťující částice <i>m</i> _{LPC}	ČSN EN 1744-1+A1, kap. 14.2	% hm.	0,0	
Objemová hmotnost ρ_{id}	ČSN EN 1097-6	Mg/m ³	2,935	
Sypná hmotnost volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Mg/m ³	1,418	
Sypná hmotnost setřeseného kameniva	ČSN EN 1097-3, příl. D	Mg/m ³	1,656	
Mezerovitost volně sypaná	ČSN EN 1097-3	%	51,7	
Mezerovitost setřesená	ČSN EN 1097-3, příl. D	%	43,6	
Rozpad čediče "Sonnenbrand" ¹⁾				
- ztráta hmotnosti po zkoušce varem	ČSN EN 1367-3	% hm.	0,3	
- zvýšení součinitele <i>LA</i>	ČSN EN 1097-2, kap. 5	-	2,6	

¹⁾ Zkouška byla provedena na vytříděném podílu 10/14.

²⁾ Zkouška byla provedena na vytříděném podílu 8/11.

